

Programm
Biomasse
Schwerpunkt Klein-Holzfeuerungen

Die europäischen und internationalen Prüfnormen für Feuerstätten

Eine vergleichende Untersuchung der Prüfmethode nach den CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormenentwürfen

ausgearbeitet durch
Christian Gaegauf und Yves Macquat
Ökozentrum Langenbruck
4438 Langenbruck

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Die europäischen und internationalen Prüfnormen für Feuerstätten

Eine vergleichende Untersuchung der Prüfmethode nach den CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormentwürfen



Versuchsaufbau im *Labor für nachhaltige Energiesysteme* des Ökozentrums Langenbruck für die simultane Erfassung der Wirkungsgrade und Emissionen von Feuerstätten im Kalorimeterraum und Verdünnungstunnel (ISO/DIS 13336) sowie im Abgas (CEN/prEN 13240)

Autoren:
Christian Gaegauf, dipl. Ing. ETH/SIA
Yves Macquat, dipl. Ing. FH

Anschrift:
Ch. Gaegauf
Ökozentrum Langenbruck
CH-4438 Langenbruck

Kommunikation:
Tel.: +41(0)62-387 31 26
Fax: +41(0)62-390 16 40
e-mail: gaegauf@oekozentrum.ch
www.oekozentrum.ch

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Projektnummer BFE 28344

Abstract

At present there are two draft standards of test methods for solid fuel burning appliances. Even though the draft standards cover the same area their test philosophy differs a lot. Where as the test method of the *Comité Européen de Normalisation* (CEN) determines efficiency by the stack loss method, the *International Organization for Standardization* (ISO) suggests the direct measurement of the power output by means of a calorimeter room. Also emission measuring differs: CEN detects the carbon monoxide (CO) content in the flue gas; ISO applies a dilution tunnel to determine total suspended particulates (TSP).

The *Laboratories for Sustainable Energy Systems* established a test rig designed to test solid fuel burning appliances in accordance with the draft standards of CEN (CEN/prEN e.g. 13240) and ISO (ISO/DIS 13336). The basic layout of the test rig is based on the draft standard ISO/DIS 13336. The test facilities consists of a calorimeter room to measure the heat release and a dilution tunnel for monitoring the emissions. Additionally the flue duct was equipped with a measuring section according to CEN/prEN standards. Calorimeter Room: The calorimeter room is an insulated chamber where the appliance is installed. The room is vented with air in order to extract the heat released by the appliance. In addition to the ISO/DIS layout, the duct for the incoming air is equipped with an electrical resistance heating. A temperature control keeps the outgoing air at constant temperature level by varying the power of the electric heating. This compensating heat load method reduces the determination of the appliance heat release to the air temperature difference measurement. In addition the compensation method copes with accuracy problems due to heat losses and thermal inertia of the calorimeter room structure. A weighing scale is installed in the calorimeter room to determine the burn rate and the end of a burn cycle. With the calorimeter room it is possible to determine directly power output, total heat release and efficiency over a burn cycle of an appliance. Dilution Tunnel: In the dilution tunnel the entire flue gas flow of the appliances is mixed with ambient air to maintain constant flow conditions (Constant Flow Sampling, CFS). Total suspended particulates (TSP) and gaseous emissions (CO) are measured in the dilution tunnel. Since the flow in the dilution tunnel is measured the emission mass flow can be monitored at any point of the burn cycle. The appliance emission factor can be determined over a burn cycle based on fuel mass or extracted heat.

To compare the performance of the two different test methods, a continuous burning appliance has been tested for efficiency and emissions with wood logs. There were two focuses in the scientific work: 1. Comparison of the direct determination of efficiency in the calorimeter room (ISO/DIS) and the flue loss method according to CEN/prEN. 2. Determination of the appliance carbon monoxide emission factor with the dilution tunnel (ISO/DIS) and the in stack measurement (CEN/prEN). The tests have been carried out simultaneously according to ISO/DIS and CEN/prEN standards. The comparison of CEN and ISO test method showed for continuous burning appliances similar test results for emissions and efficiency. Over the performed test cycle the absolute deviation for emissions was in the range of – 6.7% to + 2.2% and for efficiency in the range of – 3.8% to + 2.8%. The results are within the accuracy range of the test set-up.

The investigations are showing the equivalence of the CEN and ISO *test methods* for the determination of emissions and efficiency for continuous burning appliances. The actual CEN and ISO type test results cannot yet be compared though due their different *test procedures*. For comparable test results the test procedure such as fuel load, burn rates and number of test cycles needs to be harmonised. It must be stressed though, that due to the different test procedures, data of actual CEN or ISO type tests cannot be compared. For equivalence of data the test procedures such as fuel load, burn rate and number of test cycles needs to be harmonised.

The comparative test work provides data, which proves the equivalence of *test methods* for CO emission and efficiency. The equivalence of test methods eases mutual recognition of the standards, which is of interest to the manufacturers and users.

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Ausgangslage	3
1.2 Zielsetzung	4
2 Versuchsaufbau	4
2.1 Messaufbau nach ISO/DIS-Prüfnormen	4
2.2 Messaufbau nach CEN/prEN-Prüfnormen	6
2.3 Eichung des Kalorimeterraums	7
3 Versuchsdurchführung	9
3.1 Versuchsprogramm	9
3.2 Testofen	11
3.3 Prüfbrennstoff	12
3.4 Versuchsvorbereitung und Konditionieren des Prüfofens	14
3.5 Versuchsprozedere	14
4 Versuchsverlauf	15
4.1 Wirkungsgradbestimmung	15
4.2 Emissionsmessung	17
4.3 Vergleich des Kaminzugs	19
5 Resultate	20
5.1 Wirkungsgradbestimmung	20
5.2 Emissionsmessungen	23
6 Diskussion	28
6.1 Wirkungsgradbestimmung	28
6.2 Emissionsmessung	32
6.3 Teillastversuche gemäss ISO/DIS	34
6.4 Vergleich mit den Resultaten nach DIN 18891	36
7 Kostenabschätzung und Versuchsaufwand	37
8 Schlussfolgerungen	39
Danksagung	43
Literaturverzeichnis	43
Symbolverzeichnis	44
Anhang	46
Fehlerrechnungen	46

Zusammenfassung

Zur Zeit werden von der Europäischen Normenkommission (CEN) und der internationalen Normenorganisation (ISO) Normen für die Typenprüfungen von Feuerstätten im Wohnbereich ausgearbeitet. Die Messphilosophie zur Bestimmung der Wirkungsgrade und der Emissionen unterscheidet sich in den CEN- und ISO-Prüfnormenentwürfen in wichtigen Punkten.

Die CEN-Entwürfe [u.a. prEN 13240, Raumheizer zur Verfeuerung fester Brennstoffe] gehen von der Emissions- und Wirkungsgradmessung im Abgas der Feuerstätten bei Nominalleistung aus. Die Emissionswerte basieren auf der Konzentrationsmessung der Schadstoffe in den Abgasen. Der Wirkungsgrad wird über die Erfassung der thermischen Abgasverluste (fühlbare Wärme) und der chemischen Verluste (brennbare Gase, hier als Kohlenmonoxid, CO) indirekt berechnet.

Der ISO-Entwurf [ISO/DIS 13336, Solid fuel burning appliances] sieht die Messung der Staubfracht im Verdünnungstunnel vor, in dem das gesamte Abgas bei konstantem Volumenstrom mit Umgebungsluft (Constant flow sampling, CFS) vermischt wird. Optional können auch die Kohlenmonoxidemissionen im Verdünnungstunnel gemessen werden. Die Heizleistung und der Wirkungsgrad werden direkt in einem geschlossenen, isolierten Raum (Kalorimeter) gemessen, der mit Umgebungsluft gekühlt wird. Die ISO/DIS-Normen prüfen die Feuerstätten bei drei unterschiedlichen Abbrandraten (Minimal-, Mittel- und Maximallast).

Das Ökozentrum Langenbruck verfügt mit einem neuen Messaufbau in seinem *Labor für nachhaltige Energiesysteme* über die Möglichkeit, Feuerstätten gemäss den Normenentwürfen der CEN/prEN- und ISO/DIS-Typenprüfungen zu untersuchen. Der Messaufbau umfasst einen Kalorimeterraum und einen Verdünnungstunnel. Im Kalorimeterraum können Wärmeleistungen in einem Bereich von 0.1 bis 16 kW gemessen werden. Mit einer im Kalorimeterraum installierten Waage lassen sich exakt die Abbrandzyklen feststellen. Auf der Waage können Feuerstätten bis zu 3 Tonnen (Speicheröfen) mit einer Auflösung von 20 g gewogen werden. Im Abgaskamin werden die Abgaskomponenten für die Emissions- und Wirkungsgradmessung nach den Vorgaben der CEN/prEN-Prüfnormen analysiert. Die CEN/prEN- und ISO/DIS-Messungen können parallel erfolgen. Dadurch ist der Vergleich der erhobenen Daten bei ein und demselben Abbrand möglich.

In einem ersten Projektschwerpunkt erfolgte die Inbetriebnahme und Kalibrierung des Kalorimeterraums. Die Kalibrierung wurde mit Elektro-Widerstandsheizöfen durchgeführt. Speziell interessierte der Einfluss von variierender (ISO/DIS) und konstanter Ablufttemperatur (Ansatz Ökozentrum Langenbruck) der Kühlluft im Kalorimeterraum. Es konnte gezeigt werden, dass die Leistungsmessung mit konstanter Ablufttemperatur flinker reagiert. Die Werte der insgesamt abgegebenen Energiemengen unterscheiden sich in den beiden Messansätzen nicht, da sich die Messträgheit bei variierender Ablufttemperatur in der Aufheiz- und Abkühlphase des Prüfofens ausgleicht.

Umfangreiche Messungen von Heizleistung, Wirkungsgrad und CO-Emissionen an einer Holz-Feuerstätte bildeten den zweiten Projektschwerpunkt. Für die Untersuchung wurde ein typischer Vertreter der Kategorie *Holz-Feuerstätten mit flachem Brennstoffbett* ausgewählt. Bei diesen Feuerstätten verlaufen Abbrand und Wärmeabgabe in etwa phasengleich. Das Versuchsprogramm beinhaltete Mes-

sungen bei Nominallast nach CEN/prEN 13240 und unterschiedlichen Abbrandraten nach ISO/DIS 13336. Die nach den zwei Messverfahren erhobenen Wirkungsgrade unterscheiden sich bei allen Abbrandraten nur geringfügig. Die maximale Abweichung liegt bei 2.7 % Wirkungsgradpunkten entsprechend einer relativen Abweichung von 3.8 %. Die Messgenauigkeit liegt bei 2.1 % für das ISO/DIS-Messverfahren bzw. bei 3.2 % für dasjenige von CEN/prEN. Die Emissionsfaktoren als Masse CO bezogen auf trockenen Brennstoff variieren um ± 3 %. Beide Verfahren erzielen eine Emissionsmessgenauigkeit um 4.5 %. Damit lässt sich festhalten, dass sich die Messdifferenzen von Emissionsfaktoren und Wirkungsgraden innerhalb der Messgenauigkeit beider Prüfverfahren bewegen.

Die CEN/prEN-Norm ist messtechnisch weniger anspruchsvoll. Allfällige Fehler in der Temperaturdifferenz-Messung zwischen Abgas und Umgebungsluft wirken sich wegen der grossen Temperaturspreizung nicht so stark aus. Die Wirkungsgradbestimmung im Kalorimeterraum gemäss ISO/DIS ist empfindlicher auf Fehler in der Temperatur- und Volumenstrom-Messung. Um Fehler durch unterschiedliche Wärmeeinspeicherung in der Feuerstätte in den einzelnen Abbrandzyklen zu vermeiden, muss im ISO/DIS-Prüfprozedere das Ende eines Abbrandzyklus exakt eingehalten werden. Die Emissionsmessung im Verdünnungstunnel setzt eine genaue Volumenstrommessung voraus. Kohlenstoffbilanzen bestätigen die Zuverlässigkeit der Schadstoffmessungen im Verdünnungstunnel. Die maximale Abweichung der Kohlenstoffbilanz erreicht 11.1 % bei einem zu erwartenden Fehlerbereich von ± 5.5 %.

Die vorliegenden Messungen anhand eines typischen Vertreters von Holz-Feuerstätten mit flachem Brennstoffbett zeigen, dass die Prüfmethode der direkten (Kalorimeterraum) und indirekten (Abgas) Bestimmung des Wirkungsgrades gleichwertig sind. Dasselbe gilt für die Emissionsmessung im Abgas bzw. im Verdünnungstunnel. Vorausgesetzt Versuchsprozedere und Prüfaufbauten beider Normen sind identisch, ergeben sich vergleichbare Resultate für die Wirkungsgrade und Emissionen. Mit einer Abstimmung des ISO/DIS- bzw. CEN/prEN-Versuchsaufbaus und -prozederes erfüllte diese Feuerung die Äquivalenz der Feuerstätten-Prüfnormen. Kann diese Äquivalenz für zwei unterschiedliche Geräte nachgewiesen werden, akzeptiert ISO/DIS mit ihrer *Equivalence of Methods* andere Prüfverfahren zur Bestimmung von Emissionen und Wirkungsgraden. Derzeit lassen sich aber die Resultate aus den ISO/DIS- bzw. CEN/prEN-Typenprüfungen wegen unterschiedlichen Verfahrensabläufen bei der Prüfung *nicht* unmittelbar vergleichen.

Die vorliegende vergleichende Untersuchung ist eine wichtige Basis für allfällige Harmonisierungsbestrebungen zwischen den ISO- und CEN-Prüfnormen. Aus der Sicht der Hersteller, des Handels und der Betreiber wäre es wünschenswert, wenn es mittelfristig international einheitliche Typenprüfungen gäbe.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Holz-Feuerstätten haben eine wichtige Position für die Nutzung von Biomasse zu Heizzwecken inne. Dazu seien einige Gründe aufgeführt:

- der heutige Baustandard erfordert nur noch geringe Heizleistungen
- Holzfeuerungen substituieren elektrische und fossile Energie
- Benutzer schätzen in ihrem Wohnbereich das Erlebniseumfeld von Holz-Feuerstätten

Holz-Feuerstätten sind in den verschiedensten Formen und Funktionen als Herd, Ofen oder Cheminée auf dem Markt vertreten. Die Feuerungen weisen zusätzlich auch Zentralheizungsfunktion auf. Vermehrt werden auch automatische Feuerstätten angeboten. Aus der Sicht des Konsumentenschutzes ist es wichtig, dass bei dieser Vielfalt von Feuerungsaggregaten transparente Leistungsdaten vorliegen.

Leistungsdaten werden aufgrund von Typenprüfungen ermittelt. Innerhalb der Europäischen Union (EU) arbeitet zur Zeit ein Ausschuss an Prüfnormen für feststoffbefeuerte Raumheizgeräte mit einer Nennwärmeleistung unter 50 KW (CEN/TC 295, Residential solid fuel burning appliances). Die europäischen Normenentwürfe (CEN/prEN) decken u.a. Prüfnormen zur Ermittlung der CO-Emissionen und des Wirkungsgrades der Gerätegruppen Kochherde, Einzelöfen, Cheminées sowie Klein-Kessel ab.

Ausserhalb der Europäischen Union wurden von der Internationalen Normenorganisation (ISO) Prüfnormen für feststoffbefeuerte Raumheizgeräte erarbeitet (ISO/TC116 SC 3, Individual heating appliances). Der ISO-Normenentwurf (Draft international standard, DIS) beinhaltet ebenfalls Prüfnormen zur Bestimmung der Emissionen und des Wirkungsgrades von Einzelöfen und Cheminées [Solid fuel burning appliances, ISO/DIS 13336].

Obwohl die CEN/prEN- und ISO/DIS-Normenentwürfe denselben Gerätebereich abdecken, unterscheiden sich die vorgeschlagenen Prüfmethode in wesentlichen Punkten. Die CEN/prEN-Normenentwürfe setzen konstante Brennstoffparameter und Abgasmassenströme während des ganzen Abbrandes voraus. Demgegenüber sind die ISO/DIS-Prüfnormen mit dem Messverfahren von *Kalorimeterraum* und *Verdünnungstunnel* (Constant flow sampling, CFS) unabhängig von instationären Vorgängen während des Chargenabbrandes. Wärmeabgabe, Wirkungsgrad und Emissionsfaktoren lassen sich mit diesem Verfahren direkt bestimmen.

Um die zwei unterschiedlichen Prüfphilosophien vergleichen zu können, hat das Ökozentrum in seinem *Labor für nachhaltige Energiesysteme* einen Messaufbau gemäss den CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormen aufgebaut. Der Laboraufbau erlaubt die simultane Prüfung eines Testofens nach den zwei Prüfmethode während des gleichen Abbrandes.

1.2 Zielsetzung

Die Untersuchung hatte den Vergleich der Leistungsfähigkeit der CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormenentwürfe anhand eines typischen Vertreters der Gerätekategorie *Holz-Feuerstätte mit flachem Brennstoffbett* zum Ziel. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf dem Vergleich der Prüfverfahren für Wirkungsgrad und Emissionen. Dabei galt es Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Resultate, die Zuverlässigkeit sowie die Prüflabor- und Praxistauglichkeit der beiden Prüfmethoden zu machen.

Die Untersuchungen wollen den CEN- und ISO-Normen-Gremien Daten und Fakten liefern, die Grundlagen für allfällige zukünftige Normen-Harmonisierungen darstellen.

2 Versuchsaufbau

2.1 Messaufbau nach ISO/DIS-Prüfnormen

Basis für das Konzept der ISO/DIS-Messinfrastruktur bildete der Normenentwurf *Solid fuel burning appliances* ISO/DIS 13336. Der Messaufbau kombiniert einen Kalorimeterraum mit einem Verdünnungstunnel (Abbildung 1).

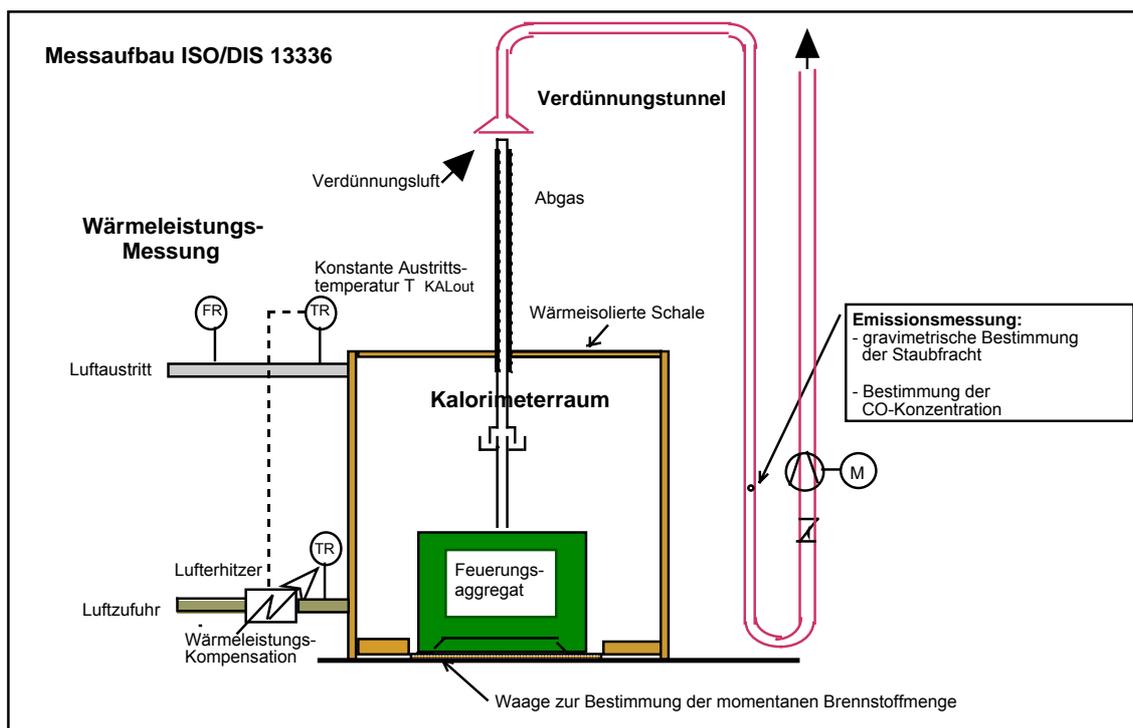


Abbildung 1 Messaufbau nach dem ISO/DIS-Prüfnormenentwurf 13336

Kalorimeterraum nach ISO/DIS

In dem isolierten, geschlossenen Kalorimeterraum lassen sich direkt Wärmeabgabe und Wirkungsgrad über einen Betriebszyklus der Feuerstätte ermitteln. Kühlluft führt die anfallende Wärme der

Feuerung aus dem Kalorimeterraum. Aus Zu- und Abluft-Temperatur sowie dem Kühlluft-Massenstrom lassen sich die abgegebene Leistung und die Nutzenergie der Feuerstätte bestimmen.

Der ISO/DIS-Normenentwurf schreibt einen minimalen Wärmewiderstand des Kalorimeterraums von $2.5 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$ bzw. maximalen Wärme-Durchgangswert von $0.4 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ vor. Der gemessene Wärme-Widerstandswert (R-Wert) des installierten Kalorimeterraums im Labor erfüllt mit $2.86 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$ (entsprechender k-Wert $0.35 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) diese Vorgaben. Der Kalorimeterraum ist mit einer 15 cm starken Isolation ausgekleidet. Bei einer Aussentemperatur von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Raumtemperatur von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt der Wärmeverlust beispielsweise 590 W. Der Raum ist in seinem Innern auf eine geringe thermische Masse hin konzipiert.

Um den Abbrand nicht zu beeinflussen, ist der Luftdruck im Kalorimeterraum auf den Wert des Barometerdruckes geregelt. Ein Feinzugregler (Toleranz $\pm 0.5 \text{ Pa}$) steuert den Druck im Raum über das drehzahlgeregelte Zuluftgebläse.

Im Kalorimeterraum ist eine Waage installiert. Mit ihr lässt sich über das Gewicht des aufgegebenen Brennstoffes das Ende eines Abbrandzyklus feststellen. Die Spezialwaage kann Feuerungsaggregate bis 3 Tonnen Gewicht (Speicheröfen) mit einer Auflösung von 20 Gramm wägen.

Kalorimeterraum mit Abluft-Thermostatisierung (ISO/ÖZL)

Der ISO/DIS-Messaufbau wurde vom Ökozentrum Langenbruck mit einer Regelung der Kalorimeterraum-Ablufttemperatur ergänzt. Die Thermostatisierung der Abluft erlaubt den Betrieb des Kalorimeterraums während eines Abbrandes des Prüfofens auf annähernd konstantem Temperaturniveau. Die Ablufttemperatur wird konstant gehalten, indem die Zulufttemperatur entsprechend der Wärmeabgabe des Prüfofens erhöht bzw. gesenkt wird. Der Zuluft wird ein Teil der warmen Abluft zur Vorwärmung beigemischt. Eine elektrische Heizung im Zuluftstrom dient der flinken Feinregelung der Zulufttemperatur. Die konstante Ablufttemperatur eliminiert Störeinflüsse durch Wärmeverluste und Wärmespeicherung des Kalorimeterraums, die bei Temperaturänderungen während des Abbrandes auftreten können.

Verdünnungstunnel

Der Verdünnungstunnel sammelt die gesamten Abgase der Feuerstätte am Ende des Abgaskamins und verdünnt sie mit Umgebungsluft. Ein Ventilator im Verdünnungstunnel sorgt für einen konstanten Volumenstrom (Constant flow sampling, CFS). Im Verdünnungstunnel werden die gas- und partikel-förmigen Schadstoffe (Kohlenmonoxid, CO und Staub) erfasst. Der Verdünnungstunnel erlaubt die Messung der Emissionsfrachten zu jedem Zeitpunkt des Abbrandes. Anhand der Frachten lassen sich die Emissionsfaktoren der Feuerungsaggregate als Schadstoffmasse bezogen auf die Energie- oder Masseneinheit des Brennstoffes angeben.

Gemäss ISO/DIS muss der CO-Anteil im Verdünnungstunnel sowie der entsprechende Volumenstrom im Verdünnungstunnel über jeden Abbrandzyklus kontinuierlich (mindestens alle zwei Minuten) erfasst werden. Die genaue Messung des Volumenstromes stellt hohe Anforderungen an die Kalibrie-

rung der Messgeräte. Durch die Verdünnung der Abgase sind die CO-Messwerte tief. Das CO-Messgerät muss deshalb einen CO-Bereich unter 100 ppm zuverlässig erfassen.

Für die Erfassung des Volumenstromes im Verdünnungstunnel eignet sich für die Messung des Staudruckes ein Annubar (Mehrpunktmessung des Staudrucks) sehr gut. Sein Druckverlust ist gering und die Sonde toleriert eine gewisse Staubfracht.

2.2 Messaufbau nach CEN/prEN-Prüfnormen

Der Messaufbau gemäss ISO/DIS wurde ergänzt mit Komponenten, die eine Prüfung der Feuerstätte nach den [CEN/prEN-Normen 12340] zulassen. Der Wirkungsgrad wird indirekt über die thermischen (Abgaswärme) und die chemischen Verluste (unverbrannte Stoffe, hier Kohlenmonoxid, CO) im Abgas bestimmt. Der ISO-Messaufbau wurde mit den folgenden Elementen ergänzt (Abbildung 2):

- Abgasventilator zur Erzeugung des vorgeschriebenen Kaminzuges von 10 ± 2 Pascal bei Nennwärmeleistung
- Drucksensor zur Kaminzugeinstellung und -überwachung (Bereich 25 Pa)
- Abgasentnahmestelle zur Erfassung der Abgaskomponenten CO/CO₂
- Temperaturfühler zur Bestimmung der Abgastemperatur

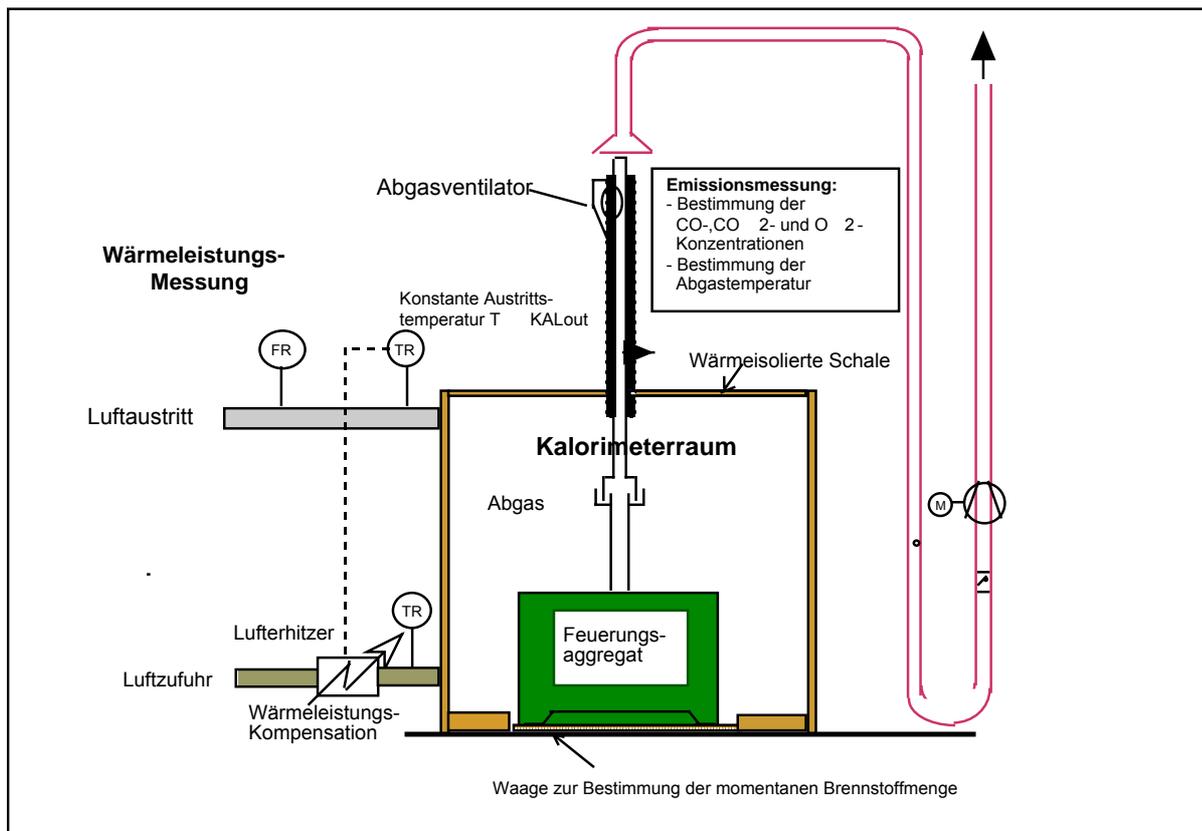


Abbildung 2 Ergänzungen des ISO/DIS-Messaufbaus für die CEN/prEN-Normen-Vergleichsmessungen

Mit der Messung der Abgaszusammensetzung (Kohlenmonoxid CO und Kohlendioxid CO₂) und der Abgastemperatur lassen sich Wirkungsgrad und Emissionen nach den CEN/prEN-Normen bestimmen. Der Abgasventilator sorgt durch einen gleichbleibenden Unterdruck für einen konstanten Abgasvolumenstrom im Kamin.

2.3 Eichung des Kalorimeterraums

Der Kalorimeterraum wird mit einer elektrischen Widerstandsheizungen kalibriert. Die zugeführte Heizenergie ist mit der Widerstandsheizung direkt messbar.

Im Messprozedere nach ISO/DIS variieren die Raum- und Lufttemperaturen (Kap. 2.1). Die Wandverluste und Wärmeeinspeicherung in der Kalorimeterraum-Verschaltung sind daher nicht konstant. Mit der Eichung des Kalorimeterraums über den gesamten Messbereich der Ofen-Wärmeleistung lassen sich diese Einflussfaktoren eliminieren.

Bei thermostatisierter Ablufttemperatur im Messprozedere des Ökozentrums Langenbruck herrschen konstante thermodynamische Verhältnisse im Kalorimeterraum. Die abgeführte Wärmemenge lässt sich exakt über die Messung der Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft und des Abluft-Massenstroms ermitteln. Die abgegebene Leistung ist bei konstant gehaltenem Abluftstrom proportional zur Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft. Daraus ergibt sich der Eichfaktor (EF) nach Gleichung 1.

Gleichung 1:
$$EF = \frac{P_{el}}{dT_{KAL}} \quad [W/K]$$

P_{el} ist die zugeführte elektrische Leistung, dT_{KAL} die Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft im Kalorimeterraum.

ISO/DIS-Eichfaktor

Bei der Messung der Wärmeabgabe des Prüfofens nach dem ISO/DIS-Messprozedere ist die Temperatur der Zuluft identisch mit der Umgebungsluft-Temperatur. Der zulässige Temperaturbereich der Zuluft liegt zwischen 10 °C und 25 °C. Die Ablufttemperatur darf als Summe von Zu- und Ablufttemperatur bei maximaler Leistung des Ofens 85 °C bzw. 50 °C bei Teillast nicht überschreiten. Die Eichung des Kalorimeterraums nach ISO/DIS ist in Abbildung 3 festgehalten.

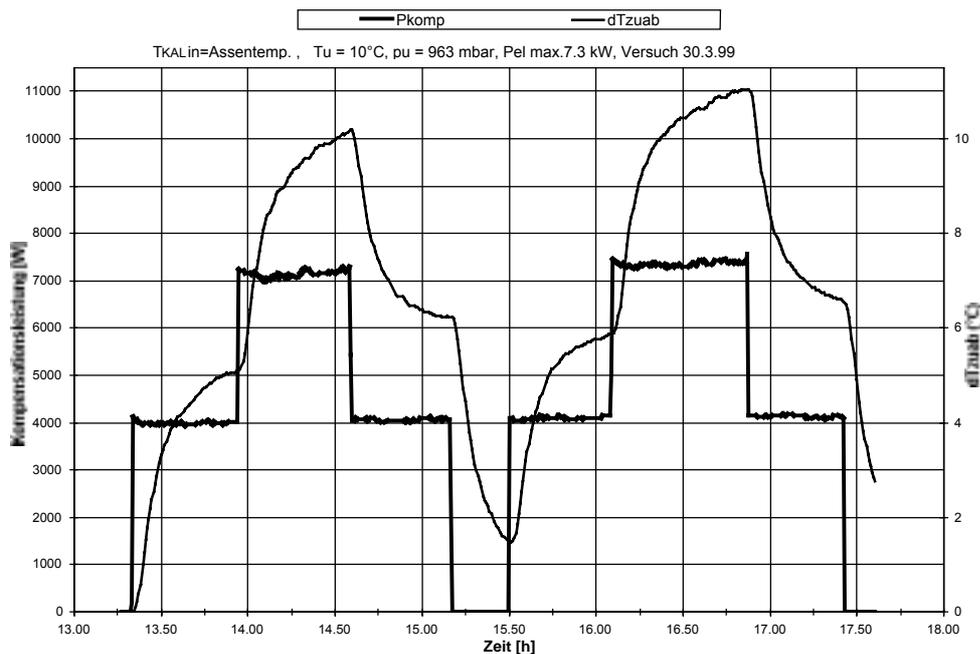


Abbildung 3 Eichung des Kalorimeterraums mit einer elektrischen Widerstandsheizung nach ISO/DIS-Normenentwurf über zwei Heizzyklen.

Der ISO/DIS-Normenentwurf gibt vor, dass zur Ermittlung des Eichfaktors der Mittelwert der Temperaturdifferenz dT_{KAL} bei ansteigender wie sinkender elektrischer Heizleistung gebildet werden soll (Werte Tabelle 1).

Tabelle 1 Eichfaktor entsprechend ISO/DIS-Vorgaben (ohne Zuluftvorwärmung)

Versuch	Prüfverfahren	Eichfaktor Bezeichnung	P_{eich} maximal [kW]	Eichfaktor [W/K]
Ei.ISO	ISO	EF.ISO	7.5	680

Eichfaktor nach Messaubau ISO/ÖZL (Ablufttemperatur konstant)

In Ergänzung zur Eichung nach ISO/DIS wurde die Eichung des Kalorimeterraums mit thermostatisierter Abluft durchgeführt (Abbildung 4). Die Ansprechzeit ist kürzer und der Endwert schneller erreicht.

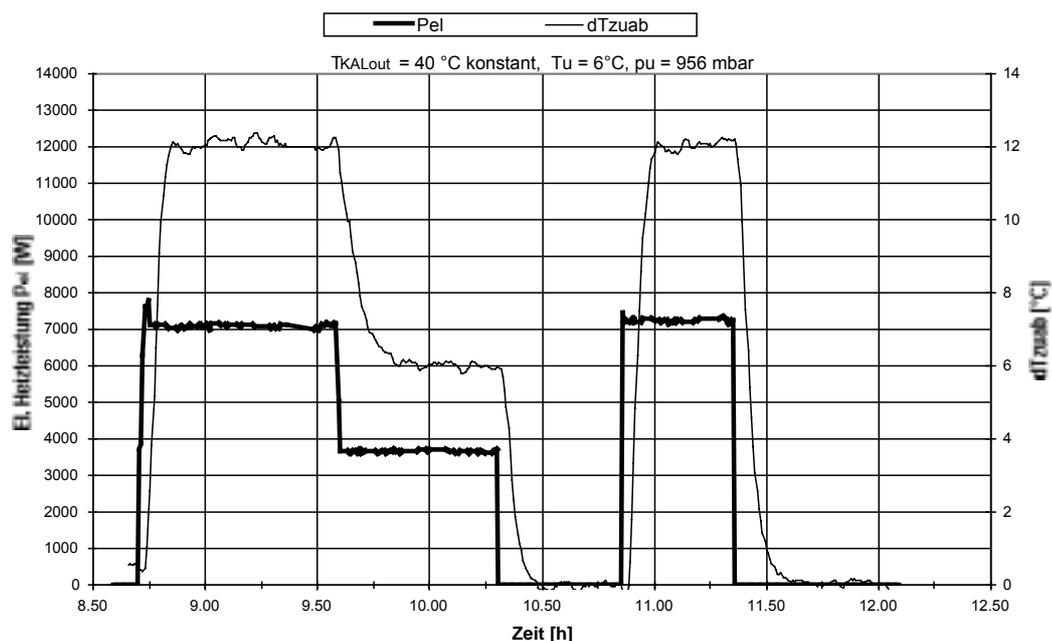


Abbildung 4 Eichung des Kalorimeterraums nach ISO/DIS-Normen ergänzt mit dem modifizierten Messaufbau ISO/ÖZL (Ablufttemperatur konstant). Zeitlicher Verlauf der elektrischen Heizleistung (P_{el}) und der Temperaturdifferenz (dT_{zuab}).

Es wurden Eichfaktoren für verschiedene konstante Betriebszustände bei Kalorimeterraum-Ablufttemperaturen (TK_{ALout}) von 25 °C, 40 °C, 43 °C mit entsprechend angepassten Kühlluft-Massenströmen ermittelt. Mit einer Auflösung der Temperaturmessung von ± 0.1 K lassen sich im Kalorimeterraum Leistungsänderungen von ± 34 bis 65 W erfassen.

Tabelle 2 Eichfaktoren bei verschiedenen Temperaturniveaus ISO/DIS bzw. ISO/ÖZL

Versuch	Prüfverfahren	Eichfaktor Bez.	Peich maximal [kW]	Eichfaktor [W/K]
Ei.ISO/Özl25	ISO/ÖZL 25°C	EF.ISO/Özl25	7.5	653
Ei.ISO/Özl40	ISO/ÖZL 40°C	EF.ISO/Özl40	7.5	596
Ei.ISO/Özl43	ISO/ÖZL 43°C	EF.ISO/Özl43	5.5	338

3 Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsprogramm

Der Schwerpunkt des Versuchsprogramms lag auf der parallelen Erhebung der Daten für die

- direkte Messung des Wirkungsgrades im Kalorimeterraum (ISO/DIS)
- indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades im Abgas (CEN/prEN)
- Emissionsmessung im Verdünnungstunnel (ISO/DIS)

- Emissionsmessung im Abgas (CEN/prEN)

während ein und demselben Abbrand.

In Ergänzung zu den Versuchsschwerpunkten erfolgten die folgenden zwei vergleichenden Untersuchungen:

- direkte Messung des Wirkungsgrades im Kalorimeterraum mit variabler Raumtemperatur und mit thermostatisierter Abluft (ISO/ÖZL)
- Naturzug (ISO) vs. Kunstzug (CEN/prEN).

Die Systematik der Versuchsreihen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 *Versuchsprogramm*

Versuch	Prüfverfahren	Abbrandrate [kg/h]
Abbrandversuche gemäss ISO/DIS-Prüfnorm 13336 mit Kalorimeterraum und Verdünnungstunnel (Versuche ISO 1-3)		
ISO 1	ISO	2.6
ISO 2	ISO	2.0
ISO 3	ISO	2.0
Abbrandversuche gemäss ISO/DIS-Prüfnorm 13336 ergänzt mit konstanter Kalorimeterraum-Ablufttemperatur (Versuche ISO/ÖZL 4-6)		
ISO/ÖZL25 4	ISO/ÖZL 25°C	2.0
ISO/ÖZL40 5	ISO/ÖZL 40°C	3.9
ISO/ÖZL43 6	ISO/ÖZL 43°C	2.8
Abbrandversuch gemäss CEN/prEN-Prüfnormen mit konstantem Kaminzug (12±2Pa) und thermostatisierter Abluft (25 bzw.40 °C konstant) (Versuch ISO/ÖZL/CEN7-9)		
ISO/ÖZL/CEN25 7	ISO/ÖZL/CEN 25°C	2.0
ISO/ÖZL/CEN40 8	ISO/ÖZL/CEN 40°C	2.0
ISO/ÖZL/CEN40 9	ISO/ÖZL/CEN 40°C	2.5

Simultanmessung

In allen Versuchen wurden die Messdaten zur Auswertung nach ISO/DIS- bzw. CEN/prEN-Normen parallel erfasst. Damit konnten Abweichungen durch Parameter-Variationen von Versuch zu Versuch ausgeschlossen werden. Für die Simultanmessungen mussten einige Kompromisse gegenüber der originalen Anordnung für das Prüfprozedere getroffen werden.

Die wichtigsten Abweichungen gegenüber den Normenentwürfen waren:

- Abgasrohr ist gemäss ISO/DIS bis zur Tauchtasse unisoliert. Nach CEN/prEN müsste das ganze Abgasrohr isoliert sein.
- Brennstoff-Aufgabemenge liegt zwischen ISO/DIS- und CEN/prEN-Vorgaben.
- Brennstoffabmessung richtet sich nach ISO/DIS.
- Abbrandrate orientiert sich an bereits vorliegenden DIN-Typenprüfungen des Testofens
- Wirkungsgrad basiert auf dem unteren Heizwert (Hu) des Brennstoffes wie in CEN/prEN vorgesehen; ISO/DIS bezieht den Wirkungsgrad auf den oberen Heizwert (Ho).

Diese notwendigen Abweichungen von den Vorgaben der Normenentwürfe beeinträchtigen den grundsätzlichen Vergleich von direkter und indirekter Bestimmung des Wirkungsgrades und der Emissionsmessungen nicht.

3.2 Testofen

Als Testofen stand ein typischer Vertreter einer Holz-Feuerstätte mit flachem Brennstoffbett zur Verfügung. Die Feuerung war bereits nach folgenden Normen typengeprüft:

- DIN 18891, Deutschland
- EPA Method 28 AND 5G-3, USA

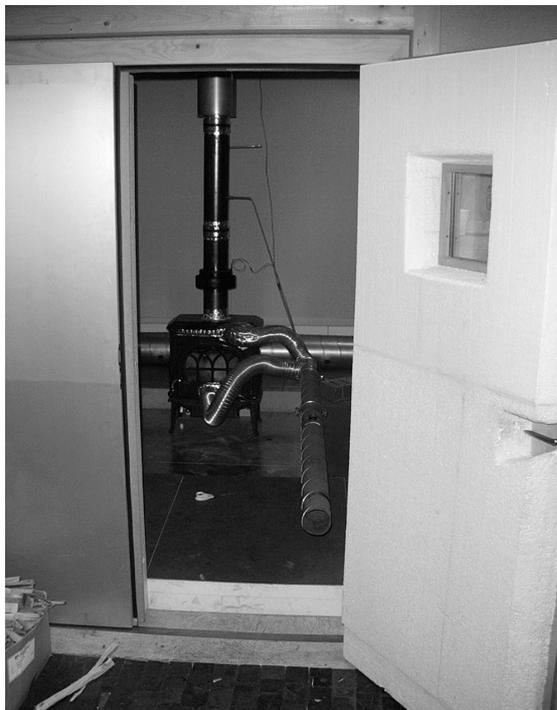


Abbildung 5 Testofen in Kalorimeterraum auf Abbrandwaage
Der Ofen ist eine Gusskonstruktion mit einer Frontglasscheibe. Mit Schieber lassen sich Primär- und Sekundärluft regulieren. Der Kaminanschluss ist auf der Oberseite des Geräts.

Tabelle 4 Technische Daten des Testofens

Fabrikat	Jøtul, Norwegen
Typ	3R (CB)
Brennraum-Abmessungen B x T x H	46 x 29 x 23 [cm]
verfügbares Brennraum-Volumen	29 Liter
Gewicht der Feuerstätte	125 kg

3.3 Prüfbrennstoff

Prüfbrennstoff-Menge nach ISO/DIS

ISO/DIS geht von einer Prüfbrennstoff-Menge (FM_{ISO}) aus, die 20% des verfügbaren Brennraumvolumens der Feuerstätte beansprucht.

Gleichung 2
$$FM_{ISO} = \frac{\rho_D \cdot V_f}{1 - \frac{u}{100}} \quad [\text{kg}]$$

Nach ISO/DIS ergibt sich mit Gleichung 2 die Prüfbrennstoff-Masse FM_{ISO} [kg] pro Abbrand für den Testofen:

Brennstoffvolumen	V_f	5.8	[l]
Brennstoffdichte	ρ_D	0.6	[kg/l]
Brennstofffeuchte	u	18	[%]

Damit resultiert eine Prüfbrennstoff-Menge für den Testofen von 4.2 kg pro Abbrand.

ISO definiert Anzahl, Form und Umfang der Scheiter entsprechend den Füllraum-Abmessungen.

Prüfbrennstoff-Menge gemäss CEN/prEN

Die Brennstoffmenge ergibt sich gemäss CEN/prEN aus der Nennleistung (Angabe Hersteller) und einer minimal zu erzielenden Abbrandzeit pro Füllcharge. Zur Stückigkeit werden bei CEN/prEN keine Angaben gemacht.

Gleichung 3
$$FM_{CEN} = 360000 \cdot \frac{P_n \cdot t_b}{Hu \cdot \eta_n} \quad [\text{kg}]$$

Nach CEN/prEN ergibt sich mit Gleichung 3 die Prüfbrennstoff-Masse FM_{CEN} [kg] pro Abbrand. Mit

Nennleistung	P_n	6.0	[kW]
Min. Abbrandzeit	t_b	1.0	[h]
Unterer Heizwert	Hu	13'950	[kJ/kg] (siehe Tabelle 6)
Nennwirkungsgrad	η_n	70	[%]

ergibt die Prüfbrennstoff-Menge für den Testofen 2.2 kg Brennstoff pro Abbrand.

Aufgrund von Vorversuchen entschieden wir uns im Sinne eines Kompromisses zwischen den ISO/DIS- und den CEN/prEN-Vorgaben für eine Chargenmenge von 3 kg Buchenholz pro Abbrand.

Tabelle 5 *Prüfbrennstoff-Mengen gemäss ISO/DIS und CEN/prEN, sowie für die Versuchsreihen gewählte Chargenmenge FM_{öZL}*

Buchenholz	FM [kg]	Anzahl der Scheiter	Geometrie der Scheiter		
			Gewicht/Scheit [kg]	Länge [mm]	Umfang [mm]
ISO/DIS	4.2	3	1.4	320	250-300
CEN/prEN	2.2	—	—	—	—
FM_{öZL}	3	3	1.0	330	250-300

Pro Abbrand wurden 3 ca. 1 kg schwere Scheiter von 33 cm Länge und 250-300 mm Umfang (ISO/DIS) aufgelegt. Die aufgegebene Brennstoffmenge lag für alle Versuche im Bereich von 3 kg ± 20 g Buchenholz.

Bestimmung des Heizwertes

In allen Versuchen wurde luftgetrocknetes Buchenholz als Prüfbrennstoff verfeuert. Vor dem Einwiegen wurden die Scheiter von der Rinde befreit (ISO/DIS). Die Holzfeuchte wurde an jedem Versuchstag aus repräsentativen Holzproben bestimmt.

Mit den kalorischen Stoffwerten des Holzes aus der Literatur [Kollmann, F.] und der Holzfeuchte errechneten wir die Heizwerte des Prüfbrennstoffes. Die Heizwerte aus der Literatur sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6 *Heizwert des trockenen Prüfbrennstoffs [Kollmann, F.]*

Brennstoff (trocken)	oberer Heizwert, Ho _{Holz} [kJ/kg]	unterer Heizwert, Hu _{Holz} [kJ/kg]
Buche	18'620	17'290

Die Umrechnung des oberen (Ho) bzw. unteren Heizwerts (Hu) vom trockenen auf den feuchten Brennstoff erfolgte nach Gleichung 4 und Gleichung 5.

$$\text{Gleichung 4} \quad Ho = \frac{Ho_{\text{Holz}}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\text{Gleichung 5} \quad Hu = \frac{Hu_{\text{Holz}} - V_{\text{Ent}} H_2 O_{\text{spez}} \cdot \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

Tabelle 7

Prüfbrennstoff: Feuchtigkeit und Heizwerte (Mittelwert aus vier Proben)

Versuch	Wassergehalt Brennstoff x (CEN) [Gew.%]	Brennstofffeuchte atro u (ISO) [Gew.%]	Hu [kJ/kg]	Ho [kJ/kg]
ISO 1, 2, 3	18.4	22.5	13'655	15'200
ISO/ÖZL25 4	16.9	20.3	13'950	15'478
ISO/ÖZL40 5	18.4	22.5	13'655	15'200
ISO/ÖZL43 6	16.1	19.2	14'130	15'647
ISO/ÖZL/CEN25 7	18.6	23.0	13'589	16'138
ISO/ÖZL/CEN40 8,9	17.0	20.5	14'414	15'962
DIN-Typenprüfung (Prüfbericht Rheinbraun)				
DIN 18891	11.0	—	15'884	

3. 4 Versuchsvorbereitung und Konditionieren des Prüfofens

Dem ISO/DIS-Verfahren entsprechend wurde die Ventilation des Kalorimeterraums und falls erforderlich die Zuluftvorwärmung gestartet und der Beharrungszustand der Temperatur abgewartet. Die Gasanalysegeräte wurden geeicht und die Abbrandwaage tariert.

Zum Konditionieren des Prüfofens wurde ein Vorfeuer entzündet. Laut ISO/DIS muss die Glutbettmasse zu Beginn eines Versuchszyklus 25% der Brennstoff-Aufgabenmenge betragen. Im vorliegenden Fall bedeutete dies bei einer Aufgabenmenge von 3 kg pro Abbrand eine Glutbettmasse von 0.75 kg. War die Grundglut erreicht und ein gleichmässiges, kaum mehr Flammen aufweisendes Glutbett etabliert, begann mit dem Nachlegen der ersten Charge der Versuchszyklus.

3. 5 Versuchsprozedere

Alle Abbrandversuche wurden in Abstimmung mit den ISO/DIS-Vorgaben mit mindestens drei Abbrandzyklen bei identischer Abbrandrate durchgeführt. Die Einstellung der Verbrennungsluft blieb über den ganzen Versuch unverändert. Für die mittlere und minimale Abbrandrate wurden in Anlehnung an ISO/DIS nach dem Nachlegen bis zum Abbrennen von 20% des Prüfbrennstoffes die Luftklappen voll offen gelassen. War der Punkt erreicht, wurden die Luftklappen bzw. -schieber bis zu einer vorher festgelegten Einstellung gedrosselt.

Ein Versuchszyklus endete, wenn die Glutbettmasse das um den Aschegehalt korrigierte Anfangsgewicht erreichte. Der Aschegehalt wurde mit 0.5 % der Holzmasse angenommen.

4 Versuchsverlauf

4.1 Wirkungsgradbestimmung

Verlauf der Wärmeleistungsabgabe

Es zeigt sich die für einen Ofen mit flachem Brennstoffbett typische Charakteristik einer sehr flinken Abgabe der Nutzwärmeleistung an den Umgebungsraum, die praktisch parallel zur Abgastemperatur verläuft (Abbildung 6). Die Bauart des Prüfofens ermöglicht nur eine geringe Wärmeeinspeicherung.

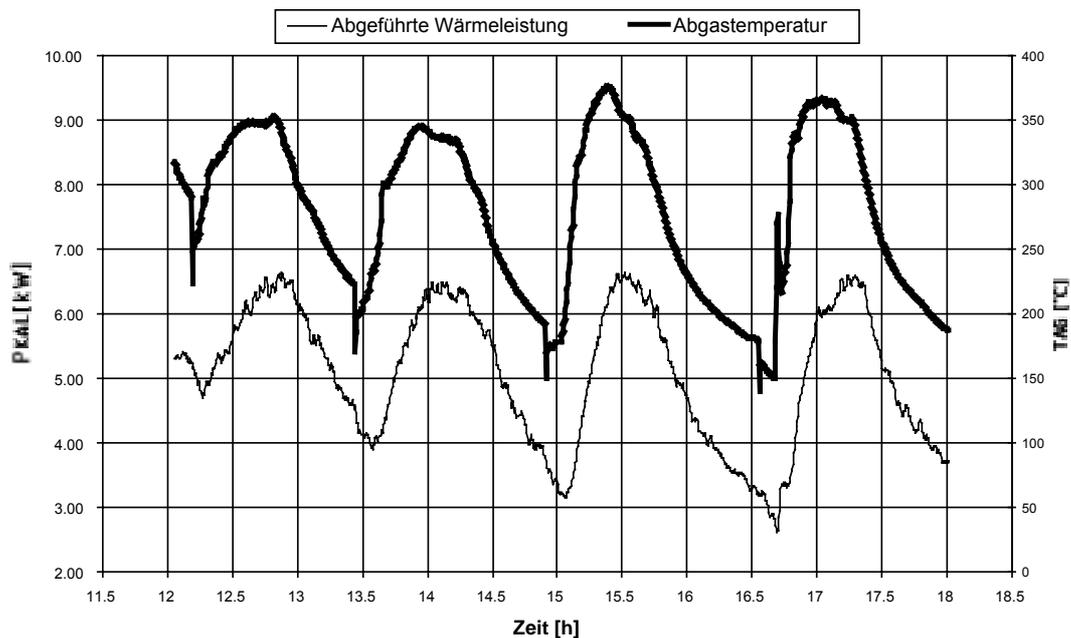


Abbildung 6 Verlauf der Wärmeabgabe des Prüfofens an den Kalorimeterraum

Wiederholbarkeit der Abbrandzyklen

In Abbildung 7 zeigt sich die für das ISO/DIS-Verfahren typische Varianz der für jeden einzelnen Abbrandzyklus ermittelten Wirkungsgrade. Grund der Unterschiede ist die variierende Rest-Speicherwärme in der Ofenmasse. Unterschiedliche Abbrandraten wie auch ändernde Verläufe der Abbrandzyklen resultieren in differierenden 'Wärme-Ladungszuständen' der Feuerstätte bei Zyklusende bzw. -beginn. Wichtige Voraussetzung für die Wiederholbarkeit der Resultate sind daher möglichst gleich verlaufende Abbrandzyklen.

Das CEN/prEN-Verfahren ist deutlich weniger empfindlich auf Änderungen in Abbrandrate und Wärmeeinspeicherung.

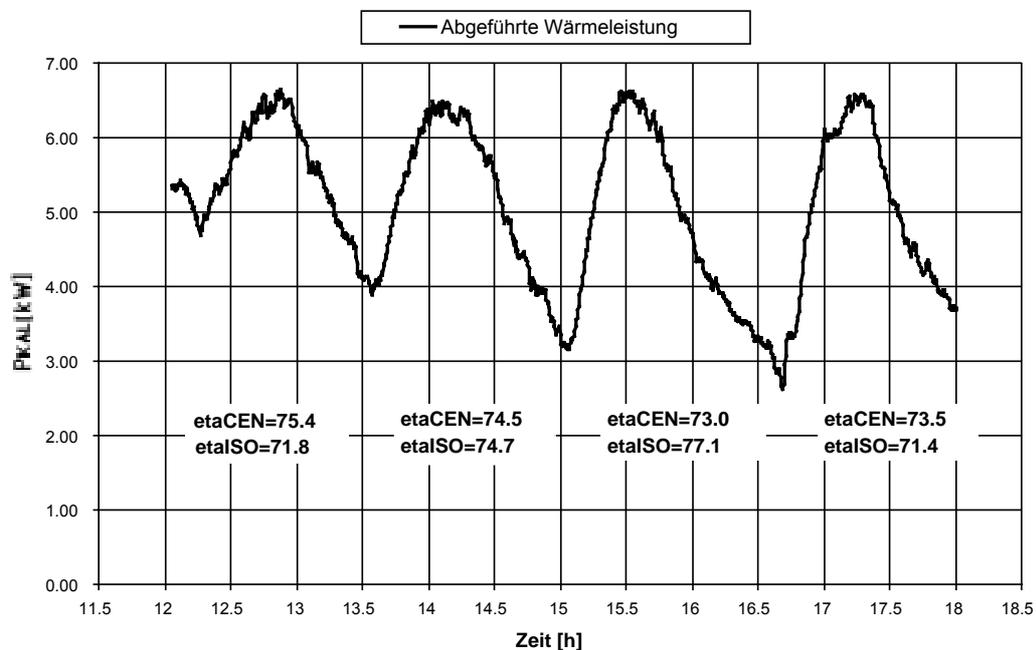


Abbildung 7 Verlauf der Wärmeabgabe an den Kalorimeterraum über vier Abbrandzyklen. Werte der Wirkungsgrade bestimmt nach der direkten Messung (ISO/DIS) und der indirekt errechneten aufgrund der Abgasmessungen (CEN/prEN).

4.2 Emissionsmessung

Messung der CO-Emissionen

Die Emissionsmessungen unterscheiden sich von ISO/DIS und CEN/prEN grundsätzlich. Im ISO/DIS-Messverfahren kann der Schadstoffmassenstrom direkt im Verdünnungstunnel gemessen werden. CEN/prEN misst die Schadstoffkonzentrationen im Abgas. In Abbildung 8 sind die Schadstoffmassenströme der ISO/DIS-Messung im Verdünnungstunnel von zwei Abbrandzyklen aufgezeichnet. Anhand des Brennstoffverzehrs und der CO-Schadstoffkonzentration im Abgas lassen sich die Massenströme auch mit den CEN/prEN-Normen hochrechnen. In der Betriebsphase korrespondieren die Werte. In der Start- und Ausbrandphase divergieren sie stark. Beim Nachlegen liegen die CEN/prEN-Werte über denjenigen im Verdünnungstunnel. Während des Ausbrands liegen die CEN/prEN-CO-Massenströme deutlich unter den im Verdünnungstunnel gemessenen. Es zeigt sich jedoch, dass sich diese Abweichungen bei der Mittelwertbildung der Schadstoffe über den gesamten Abbrandzyklus im Testofen ausgleichen.

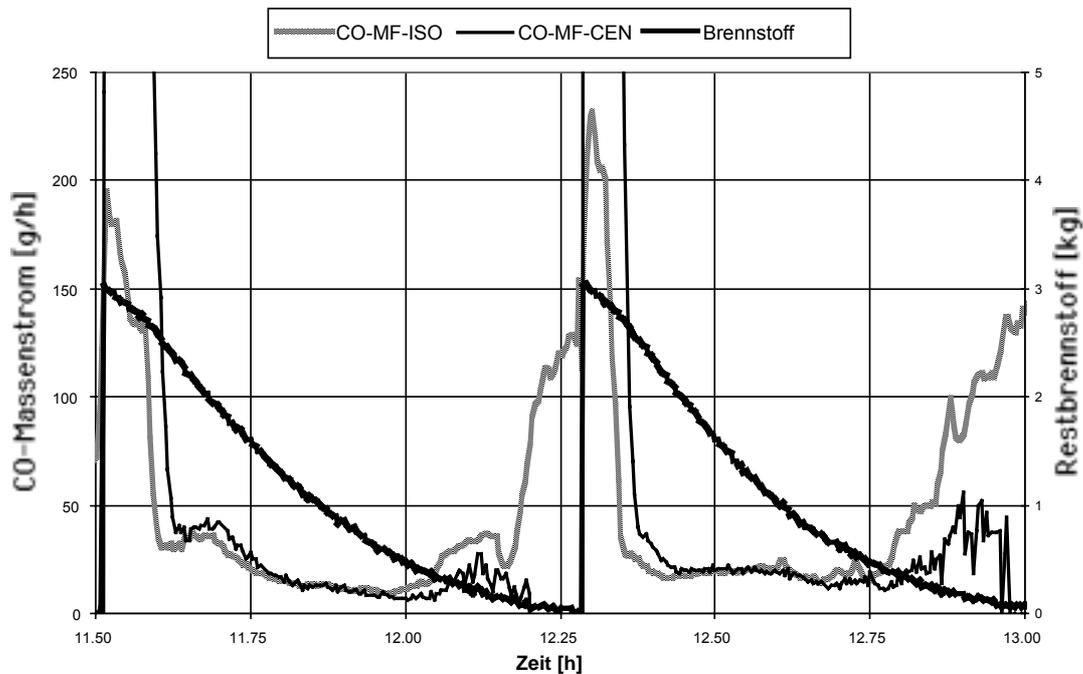


Abbildung 8

CO-Massenstromverlauf: Messung direkt im Verdünnungstunnel (CO-MF-ISO) und im Abgas nach CEN/prEN (CO-MF-CEN). In der Startphase liegen die CEN/prEN-Werte über, im Ausbrand unter den ISO/DIS-Werten.

Das Verdünnungsverhältnis während des Abbrands

Das Verhältnis aus den CO_2 -Messwerten im Abgas und im Verdünnungstunnel liefert die Verdünnung der Abgase mit Umgebungsluft. Mit der Messung des Volumenstroms im Verdünnungstunnel lässt sich der wasserfreie Abgasvolumenstrom berechnen. Bei dem praktisch konstanten Volumenstrom im Verdünnungstunnel gibt das Verdünnungsverhältnis den Verlauf des Abgasvolumenstroms an. Je geringer das Verdünnungsverhältnis, desto grösser ist der Abgasstrom.

In Abbildung 9 ist das Verdünnungsverhältnis von zwei aufeinanderfolgenden Abbrandzyklen dargestellt. Der Verdünnungsfaktor liegt zwischen 7 und 9.5. Während der Betriebsphase verharrt der Abgasvolumenstrom praktisch konstant. Die Ausschläge beim Nachlegen sind auf die nicht exakte zeitliche Synchronisation der Messgeräte zurückzuführen. Das Abfallen des Verdünnungsfaktors beim Ausbrand ist auf die tiefen CO_2 -Messwerte zurückzuführen. Kleine Messungenauigkeiten wirken sich besonders stark aus. Beim Testofen kann von einem nahezu konstanten Abgasmassenstrom ausgegangen werden.

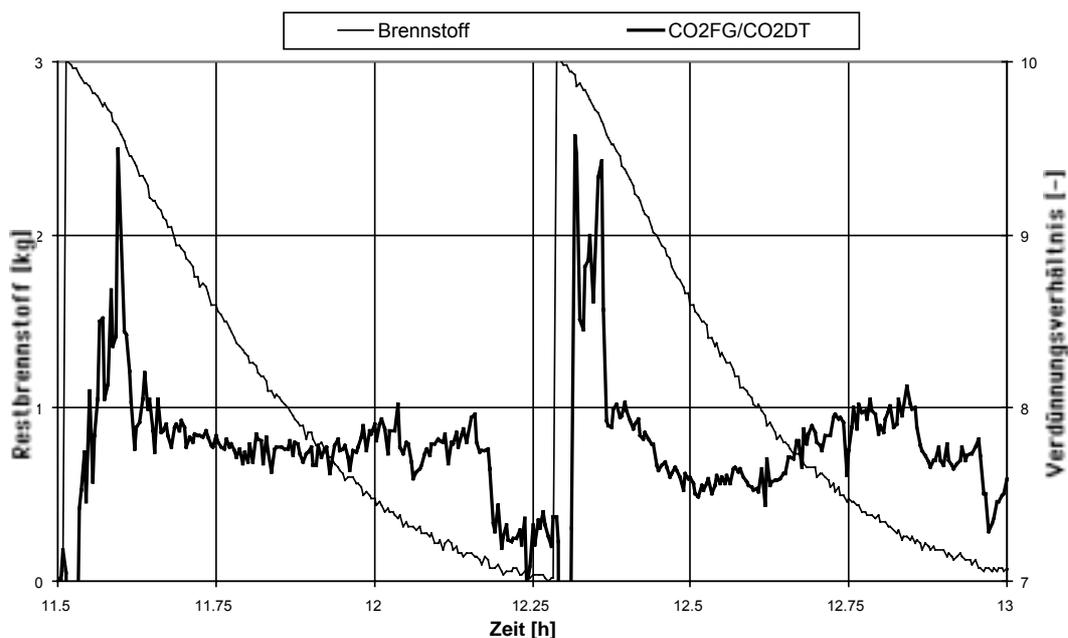


Abbildung 9 Verdünnungsverhältnis über 2 Abbrände

4.3 Vergleich des Kaminzugs

Der Unterdruck im Kamin bewegte sich in den Versuchen mit dem ISO/DIS-Kamin zwischen 16 und 25 Pascal (Abbildung 10). Die Naturzugverhältnisse in dem ISO/DIS-Messaufbau mit einer wirksamen Kaminhöhe von 4.6 m lagen damit deutlich über dem vorgeschriebenen Unterdruck mit Kunstzug von 12 Pa der CEN/prEN-Prüfnormen.

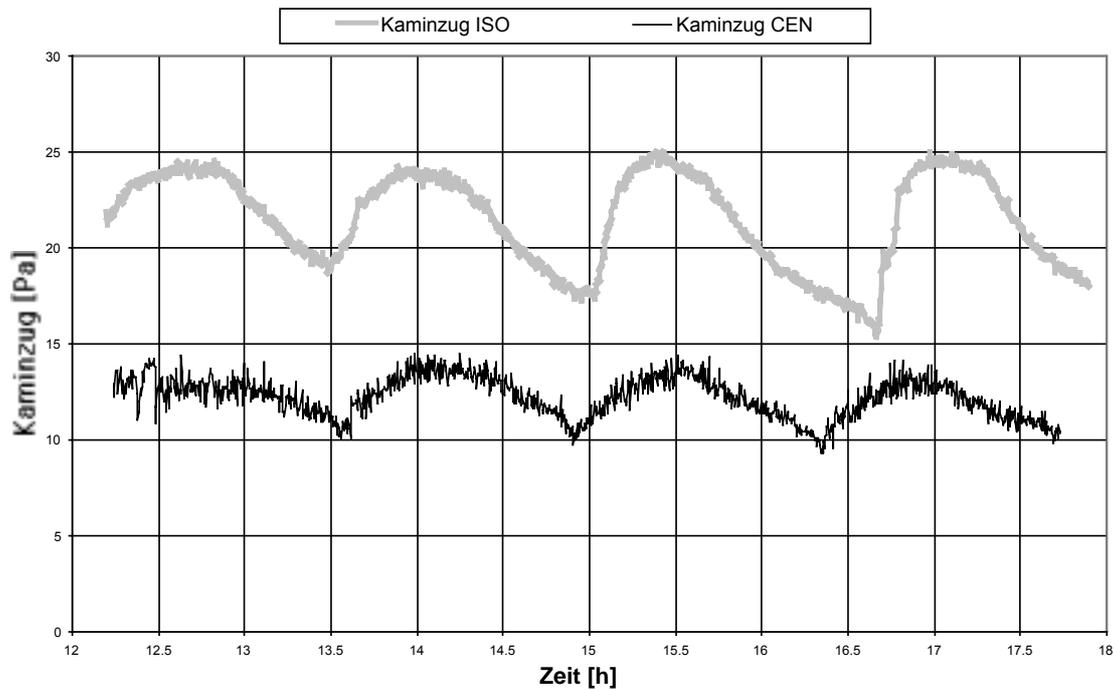


Abbildung 10 Druckverlauf im Kamin bei Naturzug (ISO/DIS) und Kunstzug (CEN/prEN) bei einer Abbrandrate von 2 kg/h

Der Naturzug variiert über einen Abbrand bei mittlerer und hoher Abbrandrate um $\pm 15\%$ des Mittelwerts.

5 Resultate

5.1 Wirkungsgradbestimmung

5.1.1 Berechnung der Wirkungsgrade nach ISO/DIS und CEN/prEN

Die Berechnungen der Wirkungsgrade erfolgten gemäss den mathematischen Grundlagen in den ISO/DIS- und CEN/prEN-Normenentwürfen.

Wirkungsgradberechnung nach ISO/DIS

Die Berechnungsgrundlage nach ISO/DIS 13336 basiert auf dem Bezug der gemessenen Wärmeabgabe zur zugeführten Energie im Brennstoff.

Die zugeführte Brennstoffenergie (E_{fuelHo} bzw. E_{fuelHu}) ergibt sich je nach Verwendung des oberen oder unteren Heizwertes aus Gleichung 6.

$$\text{Gleichung 6} \quad E_{fuelHo} = \frac{FM \cdot Ho}{1000} \quad \text{bzw.} \quad E_{fuelHu} = \frac{FM \cdot Hu}{1000} \quad [\text{MJ}]$$

FM ist die während eines Abbrandzyklus verfeuerte Brennstoff-Masse (bei unseren Versuchen jeweils 3 kg). Die Messung der Zuluft- und Ablufttemperatur im Kalorimeterraum (T_{KALin} bzw. T_{KALout}) ergibt mit dem Eichfaktor (EF) die abgegebene Leistung. Die mittlere Leistung P_{ave} über den gesamten Abbrandzyklus errechnet sich nach Gleichung 7.

$$\text{Gleichung 7} \quad P_{ave} = \frac{EF}{1000 \cdot n} \cdot \sum_0^n (T_{KALout} - T_{KALin}) \quad [\text{kW}]$$

Mit der mittleren Leistung (P_{avg}) und der Abbrandzeit (t , in Stunden) lässt sich die im Abbrandzyklus total abgegebene Energie (Q_{ISO}) bestimmen (Gleichung 8):

$$\text{Gleichung 8} \quad Q_{ISO} = P_{AVE} \cdot t \cdot 3.6 \quad [\text{MJ}]$$

Der Wirkungsgrad bezogen auf den oberen Heizwert (Ho) des Brennstoffes ist bestimmt nach der Gleichung 9:

$$\text{Gleichung 9} \quad \text{Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.} \quad [\%]$$

Anstelle des oberen Heizwertes verwendeten wir für die Vergleiche mit CEN/prEN den unteren Heizwert. Die Wirkungsgrad-Vergleichswerte wurden nach

$$\text{Gleichung 10} \quad \eta_{ISOHu} = \frac{Q_{ISO}}{E_{fuelHu}} \cdot 100 \quad [\%]$$

berechnet.

Wirkungsgradberechnung nach CEN/prEN

Der Wirkungsgrad nach CEN/prEN wird über die Abgasverluste indirekt bestimmt. Die Berechnungen basieren auf den thermischen und chemischen Verlusten im Abgas.

Die thermischen Abgasverluste ($Q_{as_{CEN}}$) bezogen auf eine Gewichtseinheit des Prüfbrennstoffes (feucht) sind in den CEN/prEN-Prüfnormen entsprechend Gleichung 11 definiert:

$$\text{Gleichung 11} \quad Q_{as_{CEN}} = (t_a - t_r) \cdot \left(\frac{cpm \cdot (C_{CEN} - Cr)}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} + \frac{1.92 \cdot (9 \cdot H + u)}{100} \right) \quad [\text{kJ/kg}]$$

Die auf die Gewichtseinheit des feuchten Prüfbrennstoffes bezogenen chemischen Verluste ($Q_{bs_{CEN}}$) lassen sich mit Gleichung 12 rechnen:

$$\text{Gleichung 12} \quad Q_{bs_{CEN}} = 12'644 \cdot \frac{CO_{FG} \cdot (C_{CEN} - Cr)}{0.536 \cdot (CO_{FG2} + CO_{FG})} \cdot \frac{1}{100} \quad [\text{kJ/kg}]$$

Der Term Cr bezieht sich auf den Kohlenstoffanteil im Rostdurchfall. In unseren Untersuchungen wurde diese Verluste vernachlässigt. Laut CEN/prEN sind sie für den Brennstoff Holz als konstant mit 0.5 % anzunehmen. Die Abgasverluste bezogen auf die zugeführte Brennstoffenergie H_u (qa_{CEN} und qb_{CEN}) ergeben sich aus Gleichung 13 und Gleichung 14.

$$\text{Gleichung 13} \quad qa_{CEN} = \frac{Q_{as_{CEN}}}{H_u} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\text{Gleichung 14} \quad qb_{CEN} = \frac{Q_{bs_{CEN}}}{H_u} \cdot 100 \quad [\%]$$

Der gesamte Wirkungsgrad ($\eta_{a_{CEN}}$) der Feuerstätte folgt aus den thermischen und chemischen Abgasverlusten (Gleichung 13 und Gleichung 14)

$$\text{Gleichung 15} \quad \eta_{a_{CEN}} = 100 - qa_{CEN} - qb_{CEN} \quad [\%]$$

5.1.2 Vergleich der Wirkungsgrade nach ISO/DIS und CEN/prEN

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen zusammengestellt. Alle Daten sind Mittelwerte aus mindestens drei in Serie durchgeführten Abbrandzyklen.

Tabelle 8 *Gegenüberstellung der Resultate nach ISO/DIS und CEN/prEN
Zusammenstellung der Kennwerte und Wirkungsgrade*

Versuch	Abbrandrate [kg/h]	Luftzahl λ [-]	Abgas temperatur [°C]	η_{CEN} [-]	η_{ISOHu} [-]	Abwei- chung [%]	η_{ISOHo} [-]
ISO/DIS 1	2.62	2.48	314	69.0	68.0	+ 1.5 %	61.1
ISO/DIS 2	2.18	3.08	272	67.7	70.4	- 3.8 %	63.3
ISO/DIS/ÖZL25 4	1.92	2.49	265	73.2	74.3	- 1.5 %	67.0
ISO/DIS/ÖZL40 5	3.92	2.95	405	56.6	56.2	+ 0.7 %	50.5
ISO/ÖZL43 6	2.82	2.44	366	66.0	68.3	- 3.4 %	61.7
ISO/ÖZL/CEN25 7	2.11	2.44	271	73.7	74.6	- 1.2 %	67.0
ISO/ÖZL/CEN40 8	2.07	2.63	268	72.6	71.9	+ 1.0 %	64.6
ISO/ÖZL/CEN40 9	2.49	2.74	311	69.6	67.7	+ 2.8 %	60.8

Die Varianz der Wirkungsgrade ist in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9 *Mittlere Varianz der nach ISO/DIS bzw. CEN/prEN ermittelten Wirkungsgrade
aller Versuche 1-7 (jeweils 3 bzw. 4 Abbrandzyklen pro Versuch)*

Versuche	Varianz η_{CEN} [%]	Varianz η_{ISO} [%]
mittlere Varianz (Versuch 1-7)	0.93	6.25

5.1.3 Fehlerrechnung

In Tabelle 10 sind die prozentualen Fehler der verschiedenen Messgrößen aufgeführt (siehe Anhang *Detaillierte Fehlerrechnung*). Die Fehler basieren auf einem repräsentativen Messzyklus und können als typisch für alle Messläufe vorausgesetzt werden.

Tabelle 10 *Fehlerrechnung für die Bestimmung der Wirkungsgrade nach CEN/prEN und
ISO/DIS*

Messgröße	Bezeichnung	Messfehler
ISO		
Brennstoff-Energie	ΔE_{fuel}	$\pm 1.1 \%$
Wärmeleistung	ΔP_{avg}	$\pm 1.75 \%$

Wirkungsgrad	Δ_{ISO}	$\pm 2.1\%$
--------------	-----------------------	-------------

Tabelle 10 Fortsetzung

Messgrösse	Bezeichnung	Messfehler
CEN		
Brennstoff-Energie	ΔE_{fuel}	$\pm 1.1\%$
Wärmeleistung	ΔQ_{aCEN}	$\pm 2.9\%$
Wirkungsgrad	Δ_{aCEN}	$\pm 3.2\%$

5.2 Emissionsmessungen

5.2.1 Berechnungsgrundlagen der Emissionsfaktoren nach ISO/DIS und CEN/prEN

Die Mittelwerte der Messgrösse CO [vol.%] im Abgas wurden gemäss CENprEN auf einen Restsauerstoffgehalt \square im Abgas $O_{2\text{norm}}$ von 13% normiert.

$$\text{Gleichung 16} \quad CO_{\text{norm}_{FG}} = CO_{FG} \cdot \frac{21 - O_{2\text{NORM}}}{21 - O_{2FG}} \quad [\text{vol.}\%]$$

Emissionsfaktoren nach den CEN/prEN-Prüfnormen auf Basis der Schadstoffkonzentrationen im Abgas

Um die Resultate der CEN/prEN- und ISO/DIS-Emissionsmessungen vergleichen zu können, mussten die gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Abgas auf Emissionsfaktoren umgerechnet werden. Basis bildet dabei die CEN/prEN-Berechnung für den mittleren Abgasmassenstrom (Gleichung 17).

$$\text{Gleichung 17} \quad \dot{m}_{FG_{CEN}} = \frac{FM}{t} \cdot \frac{1.3}{3.6} \cdot \left(\frac{C_{CEN} - Cr}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} + \frac{9H + u}{100} \right) \quad [\text{g/s}]$$

Da CO im trockenen Abgas analysiert wurde, verringert sich der Abgasmassenstrom um den Wasserdampfanteil.

$$\text{Gleichung 18} \quad \dot{m}_{FGtr_{CEN}} = \frac{FM}{t} \cdot \frac{1.3}{3.6} \cdot \frac{C_{CEN} - Cr}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} \quad [\text{g/s}]$$

Mit dem berechneten Abgasmassenstrom und den gemittelten CO-Messwerten kann der CO-Emissionsfaktor auf die *trockene* Brennstoffeinheit bezogen nach Gleichung 19 berechnet werden.

$$\text{Gleichung 19} \quad Efakt_{CO/kg} = \frac{100 + u}{100} \cdot \frac{C_{CEN} - Cr}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} \cdot CO_{FG} \cdot \rho_{CO} \cdot 10 \quad [\text{g/kg}]$$

Die auf den Brennstoff bezogenen Emissionsfaktoren können leicht auf die zugeführte Energie (Gleichung 20) bzw. auf die nutzbare Energie (unter Einbezug des Wirkungsgrades) umgerechnet werden (Gleichung 21)

$$\text{Gleichung 20} \quad E_{\text{fakt}}_{CO/EF} = \frac{E_{\text{fakt}}_{CO/kg}}{Hu} \cdot 3600 \quad [\text{g/kWh}]$$

Bezüglich nutzbarer Energie ergibt sich:

$$\text{Gleichung 21} \quad E_{\text{fakt}}_{CO/kWh} = \frac{E_{\text{fakt}}_{CO/kg}}{Hu} \cdot \frac{\eta_{CEN}}{100} \cdot 3600 \quad [\text{g/kWh}]$$

Emissionsfaktoren nach ISO/DIS im Verdünnungstunnel

Die während eines Abbrandzyklus ausgestossene CO-Masse erhält man, wenn die momentanen Schadstoffkonzentrationen mit dem Volumenstrom im Verdünnungstunnel multipliziert und über den gesamten Abbrand integriert werden. Der Emissionsfaktor ergibt sich aus dem Quotient von Schadstoffmasse und verbrannter Brennstoffmenge (trocken):

$$\text{Gleichung 22} \quad E_{\text{fakt}}_{CO/kg} = \frac{\rho_{CO}}{FM_{tr}} \cdot \sum_{\text{Start}}^{\text{Ende}} \dot{V}_{DTnorm}(t) \cdot CO_{DT}(t) \cdot \Delta t \quad [\text{g/kg}]$$

Der auf den Brennstoff bezogene Emissionsfaktor kann auf die zugeführte Energie bzw. auf die nutzbare Energie bezogen werden.

Emissionsfaktor basierend auf zugeführter Energie:

$$\text{Gleichung 23} \quad E_{\text{fakt}}_{EF} = \frac{E_{\text{fakt}}_{CO/kg}}{Hu} \cdot 3600 \quad [\text{g/kWh}]$$

Bezüglich nutzbarer Energie:

$$\text{Gleichung 24} \quad E_{\text{fakt}}_{CO/kWh} = \frac{E_{\text{fakt}}_{CO/kg}}{Hu} \cdot \frac{\eta_{ISO}}{100} \cdot 3600 \quad [\text{g/kWh}]$$

Überprüfung der Kohlenstoffbilanz

Zur Überprüfung der gemessenen Schadstofffrachten lässt sich in einer ersten Näherung eine Kohlenstoffbilanz aufgrund der Kohlenstofffracht in den Abgaskomponenten CO und CO₂ im Verdünnungstunnel erstellen. Der Vergleich dieser Kohlenstofffracht mit dem im Brennstoff zugeführten Kohlenstoff ermöglicht eine Abschätzung der Messgenauigkeit.

Die Kohlenstoffmenge im Brennstoff pro Abbrand bei Annahme eines C-Gehalts von 49% bezüglich trockenem Holz ist:

$$\text{Gleichung 25} \quad MC_{FM} = \frac{100}{100 + W} \cdot \frac{C_{ISO}}{12} \cdot FM \quad [\text{kmol}]$$

Die Kohlenstoffmenge im Abgas pro Abbrand ergibt sich mit:

Gleichung 26
$$MCO_{2DT} + MCO_{DT} = \sum_{Start}^{Ende} \dot{V}DT_{norm} \cdot \Delta t \cdot \frac{(CO_{2DT}(t) - CO_{2atm}) + CO(t)_{DT}}{100 \cdot Vn} \text{ [kmol]}$$

Der Fehler ΔC_{DT} ergibt sich aus der Bilanz zwischen dem Brennstoffkohlenstoff und der im Abgas errechneten Kohlenstoffmenge (Gleichung 27).

$$\text{Gleichung 27} \quad \Delta C_{DT} = \frac{MC_{FM} - (MCO_{2DT} + MCO_{DT})}{MC_{FM}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Die Fehlerrechnung ergibt eine messtechnisch begründete maximale Abweichung von $\pm 5.5\%$.

5.2.2 CEN/prEN- und ISO/DIS-Emissionsfaktoren

In Tabelle 11 sind die über drei bis vier Abbrände gemittelten Emissionsfaktoren zusammengestellt.

Tabelle 11 Zusammenstellung der Kennwerte und Emissionsfaktoren nach ISO/DIS und CEN/prEN

Versuch	Abbrandrate [kg/h]	Luftzahl λ [-]	gemäss CEN/pr EN			gemäss ISO/DIS	
			COFGnorm [vol. %]	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kWh} [g/kWh]	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kWh} [g/kWh]
ISO/DIS 1	2.62	2.48	0.20	27.2	8.4	29.7	9.0
ISO/DIS 3	2.16	2.45	0.21	30.2	9.0	34.3	9.5
ISO/DIS/ÖZL40 5	3.92	2.95	0.12	15.3	5.8	14.8	5.7
ISO/DIS/CEN40 8	2.07	2.63	0.33	46.9	13.7	44.2	13.0
ISO/DIS/CEN40 9	2.48	2.75	0.21	30.5	9.4	29.1	9.2

Der Vergleich der Mittelwerte über alle Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung der Emissionsfaktoren nach CEN/prEN und ISO/DIS. Auch die Emissionsfaktoren basierend auf der abgegebenen Energie unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade ergeben eine gute Übereinstimmung (Tabelle 12).

Tabelle 12 Mittelwerte der Emissionsfaktoren basierend auf dem Brennstoff (trocken) sowie der abgegebenen Energie unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades berechnet nach CEN/prEN und ISO/DIS.

	gemäss CEN/pr EN		gemäss ISO/DIS		Differenz CEN -ISO	
	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kWh} [g/kWh]	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kWh} [g/kWh]	Efakt _{CO/kg} [%]	Efakt _{CO/kWh} [%]
Mittelwerte aus ISO/DIS1 bis ISO/DIS/CEN40 9	30.0	9.26	30.4	9.28	1.4	0.5

5. 2. 3 Kohlenstoffbilanz

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Kohlenstoffbilanz für die Verdünnungstunnel-Messung aufgeführt.

Tabelle 13 Zusammenstellung der ermittelten Kohlenstoffmengen im Brennstoff bzw. im Verdünnungstunnel

Versuch	Brennstoff		Verdünnungstunnel		
	Abbrandrate [kg/h]	MCFM [kmol]	MCO ₂ DT [kmol]	MCODT [kmol]	ΔC _{DT} [%]
ISO/DIS 1	2.62	0.399	0.353	0.010	-8.9
ISO/DIS 3	2.16	0.199	0.178	0.006	-7.4
ISO/DIS/ÖZL40 5	3.92	0.400	0.398	0.005	0.6
ISO/DIS/CEN40 8	2.07	0.415	0.353	0.016	-11.1
ISO/DIS/CEN40 9	2.48	0.314	0.279	0.012	-7.6

5. 2. 4 Fehlerrechnung

In Tabelle 14 sind die prozentualen Fehler der verschiedenen Messgrößen bezüglich der Emissionen aufgeführt (siehe Anhang *Detaillierte Fehlerrechnung*). Die Fehler basieren auf einem repräsentativen Messzyklus und können als typisch für alle Messläufe vorausgesetzt werden.

Tabelle 14 Fehlerrechnung für die Bestimmung der CO-Emissionen

Messgröße	Bezeichnung	Messfehler
ISO		
CO-Volumenanteil im Verdünnungstunnel	ΔCODT	± 3.0 %
Emissionsfaktor bezüglich Brennstoff	ΔEfakt _{CO/kg}	± 4.5 %
Emissionsfaktor bezüglich Nutzwärme	ΔEfakt _{CO/kWh}	± 5.0%
CEN		
CO-Volumenanteil im Abgas	ΔCOFG	± 3.0 %
gem. Abgasmassenstrom im Kamin	ΔmFG _{CEN}	± 3.5 %
Emissionsfaktor bezüglich Brennstoff	ΔEfakt _{CO/kg}	± 4.5 %
Emissionsfaktor bezüglich Nutzwärme	ΔEfakt _{CO/kWh}	± 5.0 %
Kohlenstoffbilanz		
Verhältnis C-Brennstoff/C-Verdünnungstun.	ΔΔC _{DT}	± 5.5 %

6 Diskussion

6.1 Wirkungsgradbestimmung

6.1.1 Vergleich der direkten und indirekten Wirkungsgradbestimmung

Um die Wirkungsgrade nach der direkten (ISO/DIS) bzw. indirekten (CEN/prEN) Messmethode im identischen Abbrandzyklus zu bestimmen, musste von den originalen ISO/DIS- bzw. CEN/prEN-Prüfnormen abgewichen werden (siehe Kapitel 3.1 Versuchsprogramm). Dies schmälert aber die grundsätzlichen Aussagen bezüglich der beiden Messmethoden nicht.

Die im Kalorimeterraum direkt und im Abgas indirekt erhobenen Wirkungsgrade liegen innerhalb des gleichen Versuchs maximal 2.7 Wirkungsgradprozentpunkte auseinander (Versuch ISO/DIS 2). Die mittlere Abweichung aller Versuche beträgt 1.4 Wirkungsgradprozentpunkte.

Die indirekt erhobenen Werte (CEN/prEN) liegen bei vier von sieben Versuchen leicht unter, bei den restlichen leicht über denjenigen der direkt im Kalorimeterraum (ISO/DIS) bestimmten. Es zeigen sich somit keine systematischen Abweichungen in den Resultaten.

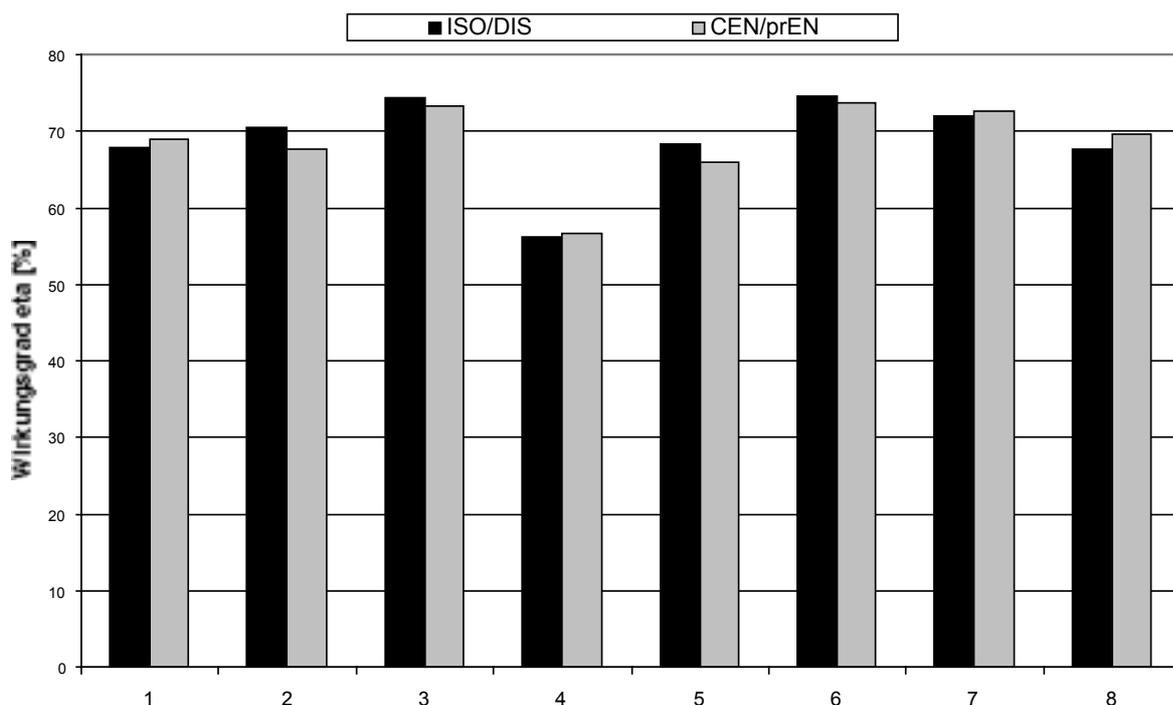


Abbildung 11 Gegenüberstellung der ermittelten Wirkungsgrade gemäss ISO/DIS und CEN/prEN

Bildet man die Mittelwerte aller Wirkungsgrade, so liegt der ISO/DIS-Wert im Schnitt um 0.6% höher als derjenige nach CEN/prEN.

Aufgrund der Untersuchungen am Testofen können die ISO/DIS- und CEN/prEN-Prüfverfahren zur Bestimmung der Feuerstätten-Wirkungsgrade für diesen Feuerungstyp als gleichwertig bezeichnet werden.

Bei identischen Versuchsprozedere und Prüfaufbauten sind die erhobenen Wirkungsgrade vergleichbar. Eine Anpassung der CEN/prEN-Normen an die ISO/DIS-Normen wäre die Prüfung der Feuerstätte bei Minimal- und Teillast. CEN/prEN sieht in den Normen bereits einen Abbrand bei Teillast (slow combustion) vor. Allerdings werden dabei Effizienz und Schadstoffe nicht erfasst. Nachdem in Österreich aufgrund nationaler Gesetze Effizienz- und Schadstoffanforderungen auch bei Teillast vorgeschrieben sind, ist es durchaus sinnvoll, dies auch in der neuen Normgebung zu berücksichtigen. Ein weiterer Unterschied liegt in der Festlegung der Prüfbrennstoff-Menge. Auch hier könnte eine Angleichung gefunden werden. Vom Messaufbau her besteht eine Differenz im Abgasrohr. Die ISO/DIS betrachtet das Abgasrohrstück als Systemteil der Feuerstätte. Entsprechend ist es nicht vollständig isoliert. CEN/prEN schreibt hingegen eine vollständige Isolation vor.

Alle aufgeführten Unterschiede sind nicht grundsätzlicher Natur und durchaus harmonisierbar. Mit der Harmonisierung des ISO- bzw. CEN-Versuchsaufbaus und –prozederes wäre die Äquivalenz der Wirkungsgrad-Prüfnormen gegeben. Ist diese Äquivalenz nachgewiesen, akzeptiert ISO/DIS 13336 mit ihrer *equivalence of methods* andere Prüfverfahren zur Bestimmung der Wirkungsgrade.

6. 1. 3 Beurteilung der ISO/DIS-Wirkungsgradbestimmung

Versuchsprozedere

Wie sich in Tabelle 9 (Kap. 5. 1. 2 Vergleich der Wirkungsgrade nach ISO/DIS und CEN/prEN) zeigt, ist die Varianz der nach ISO/DIS ermittelten Resultate innerhalb eines Versuchs grösser als im CEN/prEN-Verfahren. Die Unterschiede resultieren in erster Linie aus der bei Zyklusende bzw. -beginn nicht genau reproduzierbaren Wärmeeinspeicherung im Ofen. Kleine, zufällige Veränderungen im Abbrandverlauf können die Messergebnisse des einzelnen Abbrandes beeinflussen. Über alle Testzyklen gleicht sich der Unterschied aus.

Um eine gute Wiederholbarkeit der Abbrände und damit der Resultate zu erreichen, ist es beim ISO/DIS-Prüfverfahren wichtig, die Anfangsbedingungen für jeden Abbrandzyklus genau einzuhalten. Dazu gehören:

- homogenes Grundglutbett ohne Flammene Ausbildung
- Grundglutmasse muss zu Beginn des Versuchszyklus immer exakt dieselbe sein

Verpasst man den genauen Zeitpunkt des Zyklusendes um beispielsweise 3 Minuten, kann sich der Wirkungsgrad um 2-4 Prozentpunkte ändern.

Temperaturniveau Kalorimeterraum

Das ISO/DIS-Messprozedere lässt eine Veränderung der Kalorimeterraum-Temperatur während des Abbrandzyklus zu. Vergleicht man die Ergebnisse der Messungen ohne Thermostatisierung der Ablufttemperatur (Versuche ISO/DIS 1) mit dem Versuch bei thermostatisierter Ablufttemperatur nach dem Versuchsaufbau des Ökozentrums Langenbruck (Versuche ISO/ÖZL43 6), finden sich keine signifikanten Abweichungen bezüglich den gemessenen Wirkungsgraden. Die in den zulässigen Band-

breiten der ISO/DIS-Prüfnorm variierende Kalorimeterraum-Temperatur beeinflusst den Wirkungsgrad der Feuerung nicht.

Die Gegenüberstellung der ISO/DIS-Messung (variable Temperaturen) mit der ISO/ÖZL-Anordnung (konstante Temperaturen) zeigt folgende Vor- und Nachteile:

ISO/DIS	ISO/ÖZL:
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ einfacher Systemaufbau, ohne Luftvorwärmung und -regelung. ▪ keine Regeleinflüsse, d.h. stetiger Temperatur- bzw. Leistungsverlauf 	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ sehr flinke Reaktion auf Leistungsveränderungen ▪ konstanter Wärmefluss durch die Wände ▪ der Versuchsverlauf hat keinen Einfluss auf den Eichfaktor ▪ konstante Ablufttemperatur ermöglicht sehr konstanten Massendurchfluss im Abluftkanal
<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ träges Temperaturverhalten, da grosse veränderliche Wärmeeinspeisung in Wände ▪ unstetiger Wärmeverlust über die Wände ▪ Eichfaktoren hängen stark von der zeitlichen Struktur des Versuches ab ▪ variierende Ablufttemperatur hat Einfluss auf Abluftmassenstrom -> aufwendige Massenstrombestimmung 	<p>Nachteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ etwas grösserer Systemaufwand

Einfluss des Kaminzuges

Der Naturzug von 15 – 25 Pa, wie er sich aufgrund der Kaminanordnung der ISO/DIS-Prüfnormen einstellt, liegt deutlich über den von CEN/prEN verlangten 12 Pa (Abbildung 10).

Vergleicht man die Versuche ISO/ÖZL25 4 (Kaminzug bis 25 Pa) und ISO/ÖZL/CEN25 7 (Kaminzug gemäss CEN 12±2Pa) so zeigt sich, dass bei ähnlicher Abbrandrate und Luftzahl kein Einfluss des Kaminzugs auf den Wirkungsgrad festzustellen ist.

6. 1. 4 Beurteilung der CEN/prEN-Wirkungsgradbestimmung

Die indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades über die Messung der thermischen und chemischen Abgasverluste erwies sich als ein recht robustes Verfahren. Der CEN/prEN-Messaufbau ist wenig aufwendig, da die Abgasmessung sowohl für die Bestimmung des Wirkungsgrades wie auch der Emissionen verwendet werden kann. Messfehler in der Temperaturmessung wirken sich im Wirkungsgrad nicht stark aus, da die Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur gross ist. Mit dem CEN/prEN-Aufbau lässt sich keine Heizleistungskurve der Feuerstätte erfassen.

6.2 Emissionsmessung

6.2.1 Vergleich der ISO/DIS- und CEN/prEN-Emissionsmessung

Für den Vergleich sind sowohl die auf *trockenen Brennstoff* wie auf *Nutzwärme* (unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades) basierenden Emissionsfaktoren einander gegenübergestellt. Für die Bestimmung der Emissionsfaktoren aus den CEN/prEN-Messresultaten wurde gemäss Kap. 5.2.1

Berechnungsgrundlagen der Emissionsfaktoren nach ISO/DIS und CEN/prEN verfahren.

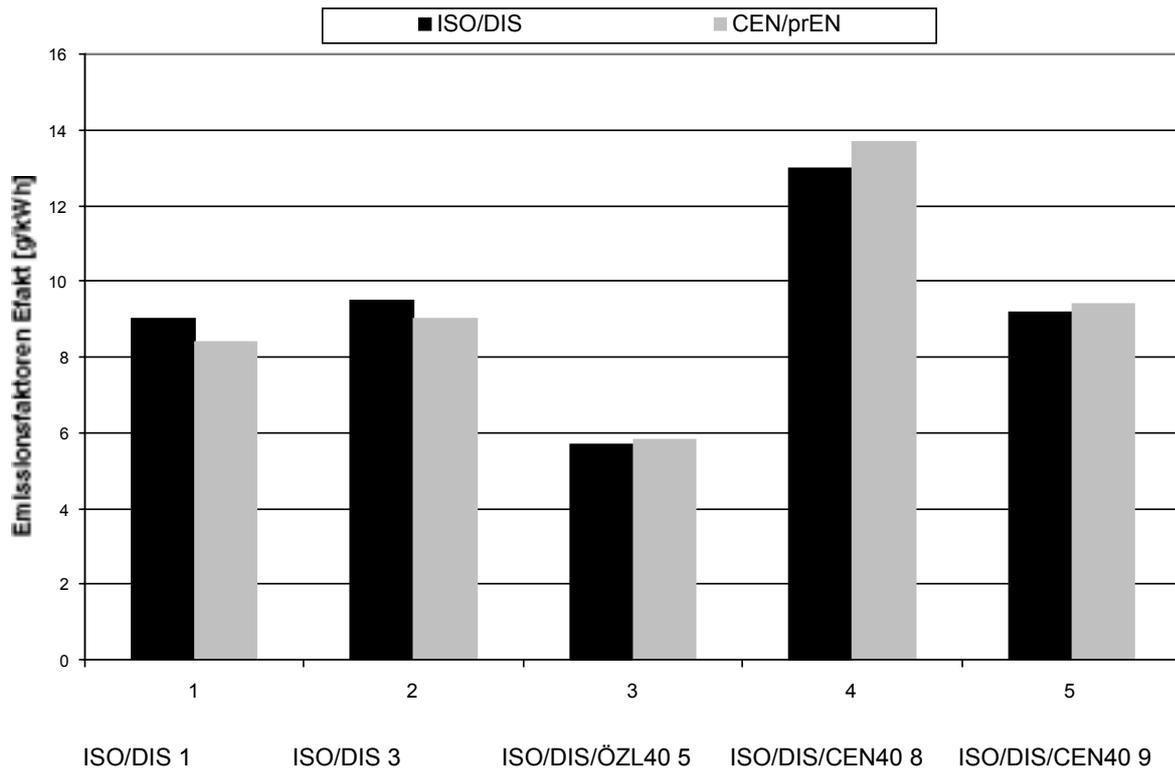


Abbildung 12 Gegenüberstellung der ermittelten Emissionsfaktoren gemäss ISO/DIS und CEN/prEN bezogen auf die nutzbare Energie

Die ermittelten Emissionsfaktoren korrespondieren im Allgemeinen gut. Die durchschnittliche Abweichung der Resultate liegt bei 4.5% des CEN/prEN-Wertes. Die im Verdünnungstunnel erhobenen Werte liegen bei zwei von fünf Versuchen leicht über, bei den restlichen leicht unter den im Kamin (CEN/prEN) ermittelten Emissionsfaktoren.

Trotz des variierenden Abgasmassenstromes (siehe Abbildung 9) lässt sich ein systematischer Einfluss dieser Grösse (bei gegebener System-Messgenauigkeit) in den Resultaten nicht feststellen. Alle Ergebnisse liegen innerhalb der abgeschätzten Fehlergrenzen. Es lässt sich auf Grund der durchgeführten Versuche keine signifikante Differenz zwischen den nach ISO/DIS bzw. CEN/ISO ermittelten Emissionsfaktoren feststellen.

Bei identischen Abbränden lassen sich mit beiden Mess- bzw. Auswertemethoden übereinstimmende Emissionsfaktoren bestimmen. Es muss bei beiden Verfahren mit einer Messungenauigkeit von $\pm 5\%$ vom Messwert ausgegangen werden.

6. 2. 2 Beurteilung der ISO/DIS-Emissionsbestimmung

Zuverlässigkeit des Messverfahrens

Vom Versuchsaufbau her stellt sich das Erfassen der CO-Emissionen im Verdünnungstunnel als zuverlässig heraus. Die Ergebnisse lassen sich reproduzieren.

Verdünnungsfaktoren

ISO/DIS gibt im Verdünnungstunnel einen konstanten Volumenstrom von $360 \text{ m}_n^3/\text{h}$ vor. Entsprechend der Abbrandrate und Luftzahl variiert der Abgasvolumenstrom der Feuerung, was sich im Verdünnungsfaktor niederschlägt. Es zeigte sich, dass das Verdünnungsverhältnis über einen Abbrand nur leicht ändert, und nur gering vom Verlauf des Kaminzuges beeinflusst wird.

Als optimal gilt ein Verdünnungsverhältnis von ungefähr 10. In den Versuchen ergaben sich mittlere Verdünnungsverhältnisse von 7.5 bis 30. Diese grosse Variation der Verdünnungsfaktoren ist auf die unterschiedlichen Abbrandraten zurückzuführen. Ein weiterer Grund liegt in der anfangs eher knappen Auslegung des Verdünnungstunnel-Gebläses. Nach einer Erhöhung der Gebläseleistung konnte mit grösseren Verdünnungsfaktoren gefahren werden.

Das Verfahren erwies sich als robust. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei hohen Verdünnungsverhältnissen die CO-Messgenauigkeit sinkt.

Kohlenstoffbilanz

Die Kohlenstoffbilanz erlaubt die Zuverlässigkeit der Schadstoffmessung im Verdünnungstunnel abzuschätzen. Die bilanzierten Differenzen liegen im Bereich von 0 % bis 11 % zwischen emittiertem (hier CO und CO₂) und Brennstoffkohlenstoff. Bei einer Messgenauigkeit von $\pm 5 \%$ lässt sich die Schadstoffmessung insgesamt als zuverlässig einstufen.

6. 2. 3 Beurteilung der CEN/prEN-Emissionsbestimmung

Zuverlässigkeit des Messverfahrens

Die Bestimmung der Emissionsfaktoren gemäss CEN/prEN mit der CO-Messung im Kamin und der Brennstoffzusammensetzung erwies sich als gangbarer Weg.

Durch den konstanten Kaminzug (12 Pa) verharrt der Abgasmassenstrom über einen Abbrandzyklus auf konstantem Niveau. Mit den Naturzug-Versuchen lässt sich dieser Einfluss abschätzen. Die Versuche 1-5 wurden mit Naturzug, 8 und 9 mit Konstantzug durchgeführt. Betrachtet man die Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren in Abbildung 12, lässt sich feststellen, dass die zwei Konstantzug-Versuche im Vergleich zum Naturzug in der Tendenz etwas höhere Emissionsfaktoren ergeben. Es liegen aber noch zu wenig Versuche vor, um dies statistisch belegen zu können.

6. 3 Teillastversuche gemäss ISO/DIS

ISO/DIS verlangt bei jeder Prüfung die Messung der Feuerstätte mit drei verschiedenen Abbrandraten. Man unterscheidet eine maximale Abbrandrate (Luftzuführungen voll geöffnet: high burn rate),

eine minimale Abbrandrate (Abbrand gerade noch stabil, kein "motten": low burn rate) sowie ein zwischen diesen Extremen liegender Abbrand (medium burn rate). Die ausgewiesenen Emissions- und Wirkungsgradwerte der Prüfung sind die Mittelwerte aus den drei Abbrandraten.

Die Resultate für die verschiedenen Abbrandraten wurden für die ISO/DIS wie für die CEN/prEN-Messmethode einander gegenübergestellt.

Wirkungsgrade gemäss ISO/DIS und CEN/prEN bei Volllast und Teillast

Tabelle 15 Zusammenstellung der zur Auswertung nach ISO/DIS relevanten Resultate der Wirkungsgradbestimmung. Zum Vergleich die entsprechenden Resultate gemäss CEN.

	Versuch	Abbrandrate [kg/h]	λ [-]	η_{ISOHu} [-]	η_{ISOHo} [-]	η_{CEN} [-]
hoher Abbrand	ISO/DIS/ÖZL40 5	3.92	2.95	56.2	50.5	56.6
mittlerer Abbrand	ISO/DIS 1	2.62	2.48	68.0	61.1	69.0
tiefer Abbrand	ISO/ÖZL/CEN40 8	2.07	2.63	71.9	64.6	72.6
Wirkungsgrad gemäss ISO/DIS aus drei Abbrandraten				65.4	58.7	66.0

Emissionsfaktoren gemäss ISO/DIS und CEN/prEN bei Volllast und Teillast

Tabelle 16 Zusammenstellung der zur Auswertung nach ISO/DIS relevanten Resultate zur Bestimmung des Emissionsfaktors. Zum Vergleich wurden aus den selben Versuchen gemäss CEN/prEN die Mittelwerte gebildet.

	Versuch	Abbrandrate [kg/h]	Luftzahl λ	ISO/DIS		CEN/prEN	
				Efakt _{CO/kg} [g/kg _{atro}]	Efakt _{CDO/kWh} [g/kWh _{nutz}]	Efakt _{CO/kg} [g/kg _{atro}]	Efakt _{CDO/kWh} [g/kWh _{nutz}]
mittlerer Abbrand	ISO/DIS 1	2.62	2.48	29.7	9.0	27.2	8.4
hoher Abbrand	ISO/DIS/ÖZL 40 5	3.92	2.95	14.8	5.7	15.3	5.8
tiefer Abbrand	ISO/ÖZL/CEN40 8	2.07	2.63	44.2	13.0	46.9	13.7
Emissionsfaktor CO gemäss ISO/DIS aus drei Abbrandraten				30.0	9.2	29.8	9.3

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse mit beiden Verfahren innerhalb der erzielbaren Messfehler liegen. Es lassen sich mit beiden Verfahren Teillastprüfungen mit guter Übereinstimmung durchführen.

6.4 Vergleich mit den Resultaten nach DIN 18891

Wirkungsgrade

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Kenndaten sollen noch mit den Prüfergebnissen nach DIN 18891 (Kaminöfen) der Prüfstelle *Rheinbraun Sibylla* verglichen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden Versuche mit ähnlicher Abbrandrate gewählt.

Tabelle 17 Vergleich mit den Resultaten nach DIN 18891 Wirkungsgrade DIN/CEN/ISO

Versuch/Verfahren	Abbrandrate [kg/h]	Luftzahl λ [-]	mitt. Abgastemp [°C]	eta DIN [-]	eta CEN [-]	eta ISO [-]
DIN 18891	1.92	2.61	297	72.0		
ISO/ÖZL25 4	1.92	2.49	265		73.5	74.3
ISO/ÖZL25 7	2.11	2.44	271		73.7	74.6

Die von Rheinbraun nach DIN 18891 ermittelten Resultate lassen sich mit den Ergebnissen aus den Versuchen *ISO/ÖZL25 4* und *ISO/ÖZL/CEN25 7* vergleichen. Der für die Messung *ISO/ÖZL25 4* um +1.5% (CEN/prEN) bzw. +2.3% (ISO/DIS) bessere Wirkungsgrad lässt sich mit der etwas kleineren Luftzahl sowie der Messungsgenauigkeit erklären. Dies gilt auch für den Versuch *ISO/ÖZL/CEN25 7* mit einer Abweichung von +1.7% (CEN/prEN) bzw. +2.6% (ISO/DIS). DIN 18891 reduziert den gemessenen Wirkungsgrad um 0.5% für Rostverluste.

Emissionsfaktoren

Die im DIN-Prüftest erhobenen Schadstoffwerte wurden auf Emissionsfaktoren umgerechnet.

Tabelle 18 Vergleich der Resultate nach DIN18891

Versuch/Verfahren	CO-Werte normiert	DIN18891		CEN/prEN		ISO/DIS	
		Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kW} h [g/kWh]	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kW} h [g/kWh]	Efakt _{CO/kg} [g/kg]	Efakt _{CO/kW} h [g/kWh]
DIN18891	0.15	20.1	6.3	-	-	-	-
ISO/DIS 3	0.21	-	-	30.2	9.0	34.3	9.5
ISO/DIS/CEN40 8	0.33	-	-	46.9	13.7	44.2	13.0

Die von uns ermittelten Emissionsfaktoren liegen deutlich über denjenigen von Rheinbraun. Das Emissionsverhalten des Prüföfens reagiert stark auf die Einstellung der Luftklappen. Es ist denkbar, hier durch optimale Einstellung bessere Werte zu erzielen. Unsere Versuche wurden in dieser Hin-

sicht nicht optimiert. Es zeigt sich gerade damit eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Repetierbarkeit der Messergebnisse unter verschiedenen Prüfstellen. Exakte Herstellerangaben bezüglich Gerätemanipulationen würden eine Verbesserung bieten.

7 Kostenabschätzung und Versuchsaufwand

Es ist schwierig, aus unseren Untersuchungen direkt auf den Versuchsaufwand, wie er im Rahmen einer ordentlichen Typenprüfung entsteht, zu schliessen. Unsere Versuchsanlage ist, bedingt durch die Durchführung von Parallelmessungen, wesentlich komplexer und aufwendiger zu bedienen als eine Anlage, auf der nur gemäss einem Prüfverfahren gemessen wird.

Die CEN/prEN-Prüfnorm schreibt auch umfangreiche sicherheitstechnische Tests vor. Diese waren nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

In der Kostenzusammenstellung ist der Materialaufwand aufgeführt. Engineering und Montage sind nicht eingeschlossen.

Materialaufwand Versuchsaufbau

Versuchsaufbau zur Bestimmung von Wirkungsgraden und Emissionsfaktoren gemäss ISO/DIS

Abbrandwaage		8'000
Kalimeterraum mit Lüftungs- und Regeltechnik, Abgasführung im 4.6 m Kamin		50'000
Verdünnungstunnel, Absaugung		10'000
Staubmessung gravimetrisch		10'000
Gesamtaufwand* ISO/DIS	CHF	78'000

* ISO/DIS verlangt die CO-Emissionsmessung nicht explizit, sollte diese jedoch - wie es ISO/DIS vorschlägt - in die Anlage integriert werden, muss mit einem Zusatzaufwand von gegen CHF 10'000 gerechnet werden.

Versuchsaufbau zur Bestimmung von Wirkungsgraden und Emissionsfaktoren gemäss CEN/prEN

Abbrandwaage		8'000
Prüfecke und Abgasanlage		20'000
CO ₂ - und CO- Messgeräte und Gasaufbereitung		15'000
Gesamtaufwand CEN/prEN	CHF	43'000

Der Anlageaufwand zur Durchführung von Versuchen gemäss ISO/DIS liegt deutlich über demjenigen, der für CEN/prEN-Versuche notwendig ist, wobei in erster Linie der Kalimeterraum kostenmässig ins Gewicht fällt. Der Aufwand für den Verdünnungstunnel ist hingegen moderat.

Aufwand Versuchsdurchführung

Durch die von ISO/DIS vorgegebenen Versuchsreihen mit drei Abbrandzyklen bei drei verschiedenen Abbrandraten liegt der Versuchsaufwand zur Bestimmung der Wirkungsgrade und Emissionen höher als bei CEN/prEN. Berücksichtigt man die Teillastprüfungen (slow combustion), die auch CEN vorsieht, ist der Unterschied nicht mehr so gross.

8 Schlussfolgerungen

Erstmals wurden mit simultanen Messungen an einem typischen Vertreter einer *Holz-Feuerstätte mit flachem Brennstoffbett* die Prüfmethode der internationalen und der europäischen Typenprüfnormen, wie sie zur Zeit als Entwürfe vorliegen, einander gegenübergestellt. Sowohl in der Bestimmung der Wirkungsgrade wie auch der Emissionen unterscheiden sich die Prüfmethode der Internationalen Normen Organisation (ISO) und der Europäischen Normenorganisation (CEN) grundsätzlich.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen müssen auf dem Hintergrund folgender Randbedingungen gesehen werden:

- Die Aussagen der vorliegenden Untersuchung gelten für einen Vertreter der Gerätekategorie *Holz-Feuerstätten mit flachem Brennstoffbett*. Bei diesem Feuerungstyp verlaufen Abbrand und Wärmeabgabe in etwa phasengleich.
- Um Parallelmessungen durchführen zu können, mussten für die unterschiedlichen Prüfprozedere von ISO/DIS und CEN/prEN Kompromisse getroffen werden. Die Aussagen dieser vergleichenden Untersuchungen beschränken sich daher auf der Gegenüberstellung der *Prüfmethode* von direkter und indirekter Wirkungsgradbestimmung sowie von der Kohlenmonoxid-Emissionsmessung im Abgaskamin und im Verdünnungstunnel.

Wegen dem unterschiedlichen Prüfprozedere lassen sich die Prüfergebnisse einer ISO/DIS-Typenprüfung deshalb *nicht* mit den Ergebnissen einer CEN/prEN-Typenprüfung vergleichen.

Äquivalenz der ISO/DIS und CEN/prEN Prüfmethode

- Die Bestimmung des Wirkungsgrades nach der direkten Methode im Kalorimeterraum (ISO/DIS) und der indirekten aufgrund der Abgasverluste (CEN/prEN) führen zu vergleichbaren Resultaten. Die Wirkungsgrade liegen innerhalb der Messfehler beider Prüfmethode. Die Vergleichbarkeit setzt allerdings den identischen Bezug der Brennstoffenergie voraus. CEN/prEN verwendet den unteren Heizwert (H_u), ISO/DIS den oberen (H_o , Brennwert).
- Die Wirkungsgradmessung im Kalorimeterraum wird nicht von den im zulässigen Bandbereich von ISO/DIS variierenden Raumtemperaturen beeinflusst.
- Die Messung der Kohlenmonoxid-Emissionen im Abgaskamin und im Verdünnungstunnel ergeben vergleichbare Werte. Die ermittelten Werte liegen innerhalb der Messfehler der Prüfmethode.
- Es konnte kein Einfluss von Naturzug und Kunstzug auf die Emissionsmessung festgestellt werden.
- Die Emissionswerte der CEN/prEN-Typenprüfung basieren auf Schadstoffkonzentrationen bei vorgegebenem Restsauerstoff im Abgas (z.B. $1200 \text{ mg/m}_n^3 @ 13 \% \text{ O}_2$). In der ISO/DIS-Typenprüfung werden die Schadstoffe direkt als Emissionsfaktoren gemessen (z.B. $4 \text{ g}_{\text{CO}}/\text{kgBrennstoff}$).

Es ist möglich, mittels der Berechnungsgrundlagen von CEN/prEN die gemessenen Schadstoffkonzentrationen in Emissionsfaktoren umzuformen. Die Gegenüberstellung der berechneten CEN/ prEN-Emissionsfaktoren zu den gemessenen von ISO/DIS ergeben vergleichbare Werte.

- Die Parallelversuche zeigen, dass die Bestimmung des Wirkungsgrades und der Emissionen trotz unterschiedlicher Prüfphilosophien zu vergleichbaren Resultaten führen. Es muss aber nochmals betont werden, dass diese Aussagen *nur* für die Prüfmethoden gelten. Wegen den unterschiedlichen Verfahrensabläufen bei der Prüfung lassen sich die ISO/DIS- bzw. CEN/prEN-Typenprüfungen *nicht* unmittelbar vergleichen.

Stärke-/Schwächeprofil

Wirkungsgradbestimmung ISO/DIS 13336

Vorteile:

- misst wirklich abgegebene Wärme
- erfasst Verlauf der Wärmeleistung
- misst bei unterschiedlichen Abbrandraten
- statistisch abgesicherte Werte (9 Abbrände)
- kalibrierbares Verfahren
- praxisnahes Verfahren

Nachteile:

- Aufbau Kalorimeter ist aufwendig
- hohe Genauigkeit für Temperatur- und Volumenstrom-Messung in der Zu- und Abluft gefordert

Wirkungsgradbestimmung CEN/prEN 13240

Vorteile:

- einfacher Messaufbau
- nicht so empfindlich auf Messfehler

Nachteile:

- Messung nur bei Nominallast
- nur 3 Abbrandzyklen gefordert (statistisch wenig abgestützt)
- konstanter Kaminzug erforderlich

Emissionsmessung ISO/DIS 13336

Vorteile:

- misst Emissionsmassenstrom
- berücksichtigt transiente Prozessparameter
- misst bei unterschiedlichen Abbrandraten
- statistisch abgesicherte Werte (9 Abbrände)
- Verdünnungstunnel vereinfacht Staubmessung (vorgesehen in ISO/DIS; in einigen europäischen Ländern vorgeschrieben)

Nachteile:

- erfordert Bau eines Verdünnungstunnels
- hohe Genauigkeit für Temperatur- und Volumenstrom-Messung im Verdünnungstunnel gefordert



Vorteile:

- einfacher Messaufbau
- CO-Emissionen können auch für Wirkungsgradbestimmung verwendet werden

Nachteile:

- Messung nur bei Nominallast
- nur 3 Abbrandzyklen gefordert (statistisch wenig abgestützt)

Basis für Harmonisierung

Mit der vorliegenden vergleichenden Untersuchung ist es erstmals möglich, den europäischen und Internationalen Normengremien Daten und Fakten zu liefern bezüglich der unterschiedlichen Prüfmethoden.

Für einen direkten Vergleich der ISO/DIS- und CEN/prEN-Typenprüfungen bräuchte es lediglich eine geringfügige Abstimmung des Versuchsaufbaus und des Prüfprozedere. Aufgrund der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Messmethoden zur Bestimmung der Emissions- und Wirkungsgrade gleichwertig sind. In der ISO/DIS ist denn auch ein Passus aufgeführt (*Equivalence of Methods*), dass bei gegebener Äquivalenz andere Prüfmethoden akzeptiert sind.

Die ermittelten Grundlagen sind eine wichtige Basis für allfällige Harmonisierungsbestrebungen zwischen den ISO- und CEN-Prüfnormen. Aus der Sicht der Hersteller, des Handels und der Betreiber wäre es wünschenswert, wenn es international einheitliche Typenprüfungen gäbe. Ein erster Schritt in diese Richtung konnte aus der Schweiz mit diesem Projekt angestossen werden.

Danksagung

Das Bundesamt für Energie (BFE) förderte diese vergleichende Untersuchung der ISO/DIS- und CEN/prEN-Normenentwürfe für Feststoff-Feuerstätten. Von der Arbeit profitieren die europäischen und internationalen Normengremien. Dank der Förderung des Projektes durch das BFE war es möglich, die Qualitätssicherung von Feuerstätten im wichtigen Bereich der Typenprüfungen zu unterstützen. Dies ist im Sinne der Branche und der Betreiber.

Literaturverzeichnis

- Kollmann, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1951
- ISO/DIS 13336, Draft International Standard, DIS, *Solid fuel burning appliances - Determination of power, efficiency and flue gas emissions*, International Organization for Standardization, (ISO) 1997
- prEN 13240, Europäische Norm Entwurf, prEN, *Raumheizer zur Verfeuerung fester Brennstoffe – Begriffe, Anforderungen, Anleitungen, Kennzeichnung und Prüfung*, 1998 CEN

Symbolverzeichnis

β	Verhältniswert $\text{CO}_2/(\text{CO}+\text{CO}_2)$	[-]
b_{CEN}	Anteil Brennbares im Rostdurchfall	[-]
C_{ISO}	Kohlenstoffgehalt im Brennstoff atro (ISO)	[Gew.%]
C_{CEN}	Kohlenstoffgehalt im Brennstoff feucht (CEN)	[Gew.%]
C_r	Kohlenstoffgehalt im brennbaren Rostdurchfall (CEN)	[Gew.%]
CO_{FG}	Volumenanteil Kohlenmonoxid im Abgas (Mittelwert)	[Vol.%]
CO_{DT}	Volumenanteil Kohlenmonoxid im Verd.-tun. (Momentanwert)	[Vol.%]
CO_{normFG}	CO-Gehalt im Abgas normiert auf 13% Restsauerstoff	[Vol.%]
CO_{2FG}	Volumenanteil Kohlendioxid im Abgas	[Vol.%]\$
CO_{2atm}	Atmosphärischer Anteil CO_2	[Vol.%]
c_{pair}	spezifische Wärmekapazität der abgeführten Luft	[kJ/kgK]
c_{pm}	mittlere spezifische Wärmekapazität des Abgases	[kJ/kgK]
dT_{KAL}	Differenztemperatur Lufteintritt/-Austritt	[°C]
ΔC_{DT}	Kohlenstoffbilanz, Differenz Brennstoff-C zu Verd.-Tun.-C	[%]
EF	Eichfaktor für kalorimetrische Messungen	[W/K]
E_{fuelHu}	Energiegehalt des Brennstoffes bez. Hu	[kJ]
E_{fuelHo}	Energiegehalt des Brennstoffes bez. Ho	[kJ]
$E_{faktCO/kg}$	Emissionsfaktor in Gramm CO pro kg Brennstoff trocken	[g/kg]
$E_{faktCO/kWh}$	Emissionsfaktor in Gramm CO pro kWh nutzbare Energie	[g/kWh]
eta_{CEN}	Wirkungsgrad gemäss CEN, auf der Basis Hu	[-]
eta_{DIN}	Wirkungsgrad gemäss DIN18891, auf der Basis Hu	[-]
eta_{ISOHo}	Wirkungsgrad gemäss ISO, auf der Basis Ho	[-]
eta_{ISOHu}	Wirkungsgrad gemäss ISO, auf der Basis Hu	[-]
FM	Aufgabemenge pro Abbrand feucht	[kg]
FM_{tr}	Aufgabemenge pro Abbrand trocken	[kg]
H	Wasserstoffgehalt im Brennstoff atro	[Gew.%]
Hu	Unterer Heizwert	[kJ/kg]
Ho	Oberer Heizwert	[kJ/kg]
Hu_{Holz}	Unterer Brennwert trocken (atro)	[kJ/kg]
Ho_{Holz}	Oberer Brennwert trocken (atro)	[kJ/kg]
m_{air}	Dichte der Umgebungsluft	[kg/m ³]
MC_{FM}	Kohlenstoffmenge pro Abbrand	[kmol]
MCO_{2DT}	In CO_2 -gebundene Kohlenstoffmenge pro Abbrand	[kmol]
MCO_{DT}	In CO-gebundene Kohlenstoffmenge pro Abbrand	[kmol]
M_{HOLZ}	Molmasse Holz	[kg/kmol]

$\dot{m}_{FG_{CEN}}$	Abgasmassenstrom feucht	[g/s]
$\dot{m}_{FGtr_{CEN}}$	Abgasmassenstrom trocken	[g/s]
n	Anzahl Messungen pro Zyklus	[-]
o	Sauerstoffgehalt im Brennstoff atro	[Gew. %]
O_{2FG}	Sauerstoffgehalt im Abgas	[Vol. %]
O_{2NORM}	Norm Restsauerstoffgehalt im Abgas (13 vol. %)	[Vol. %]
P_{EL}	mit Elektroöfen eingebrachte Eichleistung	[kW]
P_{AVE}	mittlere über Kalorimeterraum abgeführte Leistung	[kW]
$Q_{AS_{CEN}}$	thermische Abgasverluste bezogen pro kg Brennstoff feucht	[kJ/kg]
$Q_{bs_{CEN}}$	chemische Abgasverluste bezogen pro kg Brennstoff feucht	[kJ/kg]
qa_{CEN}	Freie Wärme im Abgas gemäss CEN	[%]
qb_{CEN}	Gebundene Wärme im Abgas gemäss CEN	[%]
qr_{CEN}	Gebundene Wärme im Rostdurchfall gemäss CEN	[%]
Q_{ISO}	über Kalorimeterraum abgeführte Energie	[kWh]
R	Rostdurchfall, Gewichtsanteil der Aufgabenmenge	[%]
t	Abbrandzeit	[h]
Δt	Zeitintervall von Messung zu Messung	[s]
T_{KALin}	Temperatur der Luft bei Eintritt in den Kalorimeterraum	[°C]
T_{KALout}	Temperatur der Luft bei Austritt aus dem Kalorimeterraum	[°C]
u	Brennstofffeuchte bez. trocken (atro)	[Gew. %]
$V_{ent_{H_2O_{spez}}}$	spez. Verdampfungsenthalpie des Wassers	[kJ/kg]
\dot{V}_{DT}	Volumenstrom im Verdünnungstunnel	[m ³ /h]
V_{DTNORM}	normiertes Volumen des verdünnten Abgases pro Abbrand	[m _n ³]
V_n	Normvolumen pro kmol Gas (22.41 m ³)	[m ³ /kmol]
x	Brennstofffeuchte bez. feucht	[Gew. %]
λ	Verbrennungsluft-Verhältnis (Luftzahl)	[-]
ρ_D	Prüfbrennstoffdichte trocken (atro)	[kg/dm ³]
ρ_{CO}	Normdichte von Kohlenmonoxid (1.25 kg/m ³)	[kg/m ³]

Anhang

Fehlerrechnungen

Fehlerrechnung Wirkungsgradbestimmung

Zugeführte Energie E_{fuel}

Der Hauptanteil der Fehler entsteht durch Ungenauigkeiten bei der Feuchtebestimmung und der mittels Abbrandwaage bestimmten tatsächlich umgesetzten Brennstoffmenge. Weiterhin müssen Ungleichmässigkeiten in der Holzzusammensetzung berücksichtigt werden (HoHolz bzw. HuHolz).

Feuchte	Δu (ISO) =	$\pm 3 \%$ (v.M.)
	Δx (ISO) =	$\pm 3 \%$ (v.M.)
Brennstoffmenge	ΔFM =	$\pm 20 \text{ g} \Rightarrow$ entsprechend bei 3 kg pro Abbrandzyklus
	ΔFM =	$\pm 0.67 \%$ (v.M.)
Holzzusammensetzung	Ho_{Holz} bzw. Hu_{Holz} =	$\pm 0.5 \%$

$$\Delta E_{fuel} = \sqrt{\Delta Hu(f(\Delta x))^2 + \Delta Hu_{Holz}^2 + \Delta m_{fuel}^2} = \pm 1.09\% \quad (A1)$$

Wirkungsgradbestimmung ISO

Der Fehler der nach ISO/DIS (Kalorimeterraum) bestimmten abgegebenen Energie ist, wie unter 2.3 *Eichung des Kalorimeterraums* dargestellt, in erster Linie von der Genauigkeit der Temperaturmessung sowie dem ermittelten Eichfaktor abhängig.

Temperaturmessung	$\Delta TK_{Lin/out}$ =	$\pm 0.1 \text{ °C}$ (dem Beispiel entspr. $\pm 1.2 \%$)
Eichfaktor (EF)	ΔEF =	$\pm 1.3 \%$

Bezogen auf eine mittlere abgegebene Leistung von 6.5 kW (Versuch 4, ISOözl 25°C) und einem mittleren dT_{zuab} von 8.4 °C ergibt sich ein Fehler von:

$$\Delta P_{in/out} = \sqrt{\Delta EF^2 + \Delta T_{in/out}^2} = \pm 1.75\% \quad (A2)$$

Für $\Delta \eta_{ISO}$ ergibt sich somit der Fehler mit:

$$\Delta \eta_{ISO} = \sqrt{\Delta E_{fuel}^2 + \Delta P_{in/out}^2} = \pm 2.1\% \quad (A3)$$

Fehler Wirkungsgradbestimmung CEN

Der Fehler bei der Bestimmung des Verlustes durch freie Wärme im Abgas ΔQ_{aCEN} , ist im wesentlichen proportional abhängig von den folgenden Grössen:

Temperaturbestimmung von Abgastemperatur t_a und Umgebungstemperatur t_r , dabei ist vor allem die Bestimmung der Abgastemperatur mit einem Fehler bis zu $\pm 5 \text{ °C}$ behaftet (Strahlungs- und

Strömungseinflüsse). Für eine mittlere Temperaturdifferenz ($t_a - t_r$) von 250 K ergibt sich ein Fehler von ± 2 [%] v.M.

Die mittlere Wärmekapazität des Abgases C_{pm} wird aus der Tabelle abgelesen und berücksichtigt die konkrete Abgaszusammensetzung nicht. Wir rechnen deshalb mit einem $\Delta C_{pm} \pm 0.5$ %, ΔCO_2 wird mit einem Fehler von ± 2 % angegeben.

$$\Delta Q_{a_{CEN}} = \sqrt{\Delta(t_a - t_r)^2 + \Delta C_{pm}^2 + \Delta CO_2^2} = \pm 2.87[\%] \quad (A4)$$

Der Einfluss von $\Delta Q_{b_{CEN}}$ und $\Delta Q_{r_{CEN}}$ kann demgegenüber vernachlässigt werden, da $Q_{a_{CEN}}$ über 90 % des Verlustes ausmacht, die anderen Fehler demgegenüber also kaum ins Gewicht fallen.

Für $\eta_{a_{CEN}}$ ergibt sich mit $\Delta E_{fuel} = 1.1$ % somit der Fehler:

$$\Delta \eta_{a_{CEN}} = \sqrt{\Delta E_{fuel}^2 + \Delta Q_{a_{CEN}}^2} = \pm 3.16[\%] \text{ v.M.} \quad (A5)$$

Fehlerrechnung Emissionen

Normierung von CO und CO₂

Hier gehen die Messfehler bei der Abgasanalyse in die Rechnung ein.

Kohlenmonoxid	$\Delta CO_{FG} =$	2 % (v.M.)
Sauerstoff	$\Delta O_{2FG} =$	3.5% da sich der Fehler für den Therm 21- O ₂ bei O ₂ ungefähr 13 Vol % anteilmässig vergrößert.

$$\Delta CO_{norm_{FG}} = \sqrt{\Delta CO_{FG}^2 + \Delta O_{2FG}^2} = \pm 4\% \quad (A6)$$

Für ΔCO_{2FG} gilt ebenfalls ein Fehlerbereich von ± 4 % vom Resultat.

Emissionsfaktor $E_{fakt_{CO/kg}}$ (CEN)

Brennstoffmasse trocken	$\Delta FM_{tr} =$	0.5 % (v.M.)
Kohlendioxidanteil	$\Delta CO_{2FG} =$	2 % (v.M.)
Kohlenmonoxidanteil	$\Delta CO_{FG} =$	3 % (v.M.)
Kohlenstoffgehalt im Brennstoff	$\Delta C_{CEN} =$	1 % (v.M.)

Der Fehler von ρ_{CO} kann vernachlässigt werden.

$$\Delta E_{fakt_{CO/kg}} = \sqrt{\Delta FM_{tr}^2 + \Delta CO_{2FG}^2 + \Delta CO_{FG}^2 + \Delta C_{CEN}^2} = \pm 4\% \quad (A7)$$

Wobei natürlich die durch das Messverfahren bedingten systematischen Fehler hiermit nicht erfasst werden können. Dazu mehr in der Diskussion unter 6. 2. 3 *Beurteilung der CEN/prEN-Emissionsbestimmung*.

Emissionsfaktor $E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kWh}}$ (CEN)

Emissionsfaktor $E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kg}}$	$\Delta E_{\text{fakt}_{\text{co}/\text{kg}} =$	4 %	(v.M.)
Unterer Heizwert	$\Delta H_u =$	1 %	(v.M)

$$\Delta E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kWh}}} = \sqrt{\Delta E_{\text{fakt}_{\text{co}/\text{kg}}}^2 + \Delta H_u^2} = 4.5\% \quad (\text{A8})$$

Emissionsfaktor $E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kg}}$ (ISO)

Normvolumen Verd.Abgas	$\Delta V_{\text{DTNORM}} =$	3 %	(v.M.)
Kohlenmonoxidanteil	$\Delta \text{CO}_{\text{DT}} =$	3%	(v.M.)
Brennstoffmasse trocken	$\Delta \text{FMtr} =$	0.5 %	(v.M.)
Abbrandzeit	$\Delta t =$	0.5 %	(v.M.)

$$\Delta E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kg}}} = \sqrt{\Delta V_{\text{DTNORM}}^2 + \Delta \text{CO}_{\text{DT}}^2 + \Delta \text{FMtr}^2 + \Delta t^2} = \pm 4.5\% \quad (\text{A9})$$

Emissionsfaktor $E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kWh}}$ (ISO)

Emissionsfaktor $E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kg}}$	$\Delta E_{\text{fakt}_{\text{co}/\text{kg}} =$	4.5 %	(v.M.)
Unterer Heizwert	$\Delta H_u =$	1 %	(v.M)

$$\Delta E_{\text{fakt}_{\text{CO}/\text{kWh}}} = \sqrt{\Delta E_{\text{fakt}_{\text{co}/\text{kg}}}^2 + \Delta H_u^2} = 5\% \quad (\text{A10})$$

Kohlenstoffbilanz ΔC_{DT}

Brennstoffmasse trocken	$\Delta \text{FMtr} =$	0.5 %	(v.M.)
Kohlenstoffgehalt im Brennstoff	$\Delta C_{\text{CEN}} =$	1 %	(v.M.)
Normvolumen Verd.Abgas	$\Delta V_{\text{DTNORM}} =$	3 %	(v.M.)
Kohlenmonoxidanteil	$\Delta \text{CO}_{2\text{DT}} =$	4%	(v.M. bei sehr kleinen Konzentrationen unter 0.5 Vol%)

$$\Delta \Delta C_{\text{DT}} = \sqrt{\Delta \text{FMtr}^2 + \Delta C_{\text{CEN}}^2 + \Delta V_{\text{DTNORM}}^2 + \Delta \text{CO}_{2\text{DT}}^2} = \pm 5.5\% \quad (\text{A11})$$

Der Fehler in der CO-Messung ist zu vernachlässigen.