

Programm
Biomasse

Neues Prüfverfahren für Stückholz-Speicheröfen

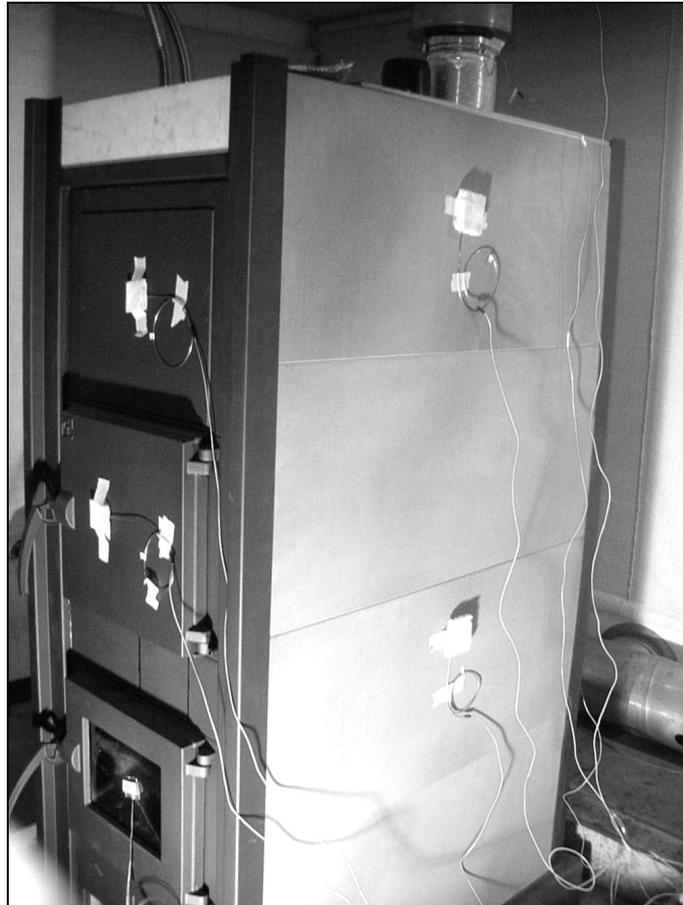
**Grundlagen für eine Prüfnorm zur Bestimmung von
Wärmeleistung, Wirkungsgrad und Emissionen**

ausgearbeitet durch
Yves Macquat und Christian Gaegauf
Ökozentrum Langenbruck
4438 Langenbruck

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Neues Prüfverfahren für Stückholz-Speicheröfen

Grundlagen für eine Prüfnorm zur Bestimmung von Wärmeleistung,
Wirkungsrad und Emissionen



Speicherofen mit Kesseleinsatz im *Labor für nachhaltige Energiesysteme* am Ökozentrum Langenbruck. Versuchsaufbau für die Grundlagenarbeit zur Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens für Stückholz-Speicheröfen. Vergleich der Messverfahren zur qualitativen Bestimmung der Heizkurve: Parallel zu den Wärmeleistungsmessungen der Feuerstätte im Kalorimeterraum erfolgte die Temperaturmessung an der Ofenoberfläche.

Autoren:

Yves Macquat
dipl. Ing. FH

Christian Gaegauf
dipl. Ing. ETH/SIA

Anschrift:

Ökozentrum Langenbruck, Schwengistrasse 12, CH-4438 Langenbruck

Kommunikation:

Tel.: +41(0)62/387 31 37
Fax: +41(0)62/390 16 40
macquat@oekozentrum.ch

Tel.: +41(0)62/387 31 26
Fax: +41(0)62/390 16 40
gaegauf@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 263463

Abstract

At present there are no standards for type tests supplying test methods and test procedures to determine power output, efficiency and emissions of slow heat release appliances burning wood. Nowadays type tests of heat accumulating appliances are done according to test standards for continuous burning appliances (e.g. DIN 18891). There is quite a discrepancy between the test procedure for actual type tests and the real world conditions of such appliances. The data achieved in type test thus do not correspond with the performance when operating the appliances under real world conditions. This situation was the motivation of the research group at the Centre of Appropriate Technology, Langenbruck to do basic research to develop test standards for accumulating appliances. The proposed test methods and procedures followed as far as possible the draft European and international standards for solid fuel burning appliances CEN/prEN 13240 and ISO/DIS 13336 respectively. The proposed methods have been tested with three heat accumulating appliances.

The new type test combines the flue loss method to determine the appliance efficiency, the qualitative course of heat power over a test cycle by temperature difference measurement of the heat extracting air of a calorimeter room and the emission testing in the dilution tunnel for total suspended particles and gaseous effluents in the stack. Criteria are proposed for easy identification of the appliance performance as a slow heat release type stove by the consumer. The draft test methods have been presented to the working group WG 5, responsible for test methods in the European test standard body CEN/TC 295 for solid fuel burning appliances.

Inhaltsverzeichnis	
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Ausgangslage	3
1.2 Prüfnormen	3
1.3 Vergleich der Prüfnormenentwürfe CEN/TC 295 und ISO/TC116 SC 3	3
2 Anforderungen an eine neue Typenprüfung	4
2.1 Philosophie	4
2.2 Zielsetzung	4
2.3 Berücksichtigung der Partikelemissionen	5
3 Versuchsaufbau	5
3.1 Labormessaufbau	5
3.2 Bestimmung von Wirkungsgrad und Wärmeabgabeleistung bzw. Heizkurve	6
3.3 Emissionen	6
4 Versuche	7
4.1 Versuchsprogramm	7
4.2 Testöfen	8
5 Resultate	9
5.1 Wirkungsgrad	9
5.2 Heizkurve	9
5.3 Emissionen	10
6 Diskussion	12
6.1 Wirkungsgrade	12
6.2 Bestimmung der Heizkurve mittels Kalorimeterraum und Oberflächentemperaturen	12
6.3 Emissionen	12
6.4 Vergleich des neuen Prüfverfahrens mit der geltenden DIN-Prüfnorm	13
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	15
Danksagung	16
Literaturverzeichnis	16
Anhang	17

Zusammenfassung

Zur Zeit existieren keine Prüfnormen für die Messung von Wärmeleistung, Wirkungsgrad und Emissionen von Stückholz-Speicheröfen (Zeitbrand-Feuerstätten). Die Typenprüfung von Speicheröfen erfolgt heute behelfsmässig nach den Normen für Feuerstätten leichter Bauart (z.B. DIN 18891). Die Diskrepanz zwischen der heute angewendeten Typenprüfung und dem Praxisbetrieb von Speicheröfen hat zur Folge, dass die erzielten Leistungswerte in der Prüfung nicht den Leistungsdaten der Feuerungen im Betrieb entsprechen. Das *Ökozentrum Langenbruck* machte es sich zur Aufgabe, Grundlagen für eine Prüfnorm zu entwickeln, die eine praxisnahe Typenprüfungen von Stückholz-Speicheröfen ermöglicht.

Ausgehend von den Prüfnormenentwürfen für Feuerstätten der europäischen Normenkommission (CEN/TC 295) und der internationalen Normenkommission (ISO/TC 116 SC 3) wurde ein neues Prüfverfahren für Feuerstätten schwerer Bauart (Speicheröfen) entwickelt und den zuständigen Normengremien vorgeschlagen.

Die Grundlagenarbeiten umfassten die folgenden Schwerpunkte:

- Evaluation möglicher Messverfahren für Stückholz-Speicheröfen zur Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmeabgabe (Heizkurve) sowie der gas- und staubförmigen Emissionen.
- Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens mit geeigneten Mess- und Prüfprozederes für eine praxisgerechte Typenprüfung von Stückholz-Speicheröfen.
- Das vorgeschlagene Prüfverfahren soll an drei typischen Vertretern von Stückholz-Speicheröfen anhand von Laborversuchen getestet werden.

Die Messinfrastruktur im *Labor für nachhaltige Energiesysteme* am *Ökozentrum Langenbruck* basiert auf den CEN- und ISO-Normenentwürfen für Feuerstätten. Sie erlaubt die simultane Untersuchung einer Feuerstätte nach den beiden Prüfnormen. Der Messaufbau zur Erarbeitung der Grundlagen für ein neues Prüfverfahren von Stückholz-Speicheröfen umfasste einen Kalorimeterraum und einen Verdünnungstunnel. In dem isolierten, geschlossenen Kalorimeterraum liess sich direkt die Wärmeabgabe und der Wirkungsgrad des Speicherofens ermitteln. Aussenluft führte als Kühlluft die von der Feuerung an den Raum abgegebene Wärme aus dem Kalorimeterraum ab. Für den Speicherofen mit Kesseleinsatz war ein Wasserkreislauf eingerichtet worden. Aus der Wärmeabfuhr von Luft und Wasser ergibt sich die insgesamt nutzbare Wärmeleistung der Holzfeuerung. Neben der direkten Wärmeabgabemessung der Speicheröfen im Kalorimeterraum wurde ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Wärmeabgabe untersucht. Dazu erfolgten Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen der Ofenoberfläche. Anhand der Oberflächentemperaturen wurde der Heizkurvenverlauf der Feuerstätte qualitativ angenähert. Die Wirkungsgradmessung basierte auf den CEN-Normen mit der Erfassung der Abgasverluste im Kamin. Dazu wurden im Kamin die Abgastemperatur sowie der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt (CO₂ bzw. CO) im Abgas erfasst. Die Kohlenmonoxidwerte dienen gleichzeitig auch für die Erfassung der CO-Emissionen. Die staubförmigen Emissionen wurden in einem Verdünnungstunnel gemessen. Der Verdünnungstunnel sammelte das Abgas der Feuerstätte am Ende des Abgaskamins und verdünnte es mit Umgebungsluft. Ein Ventilator im Verdünnungstunnel sorgte für einen konstanten Volumenstrom (Constant Flow Sampling, CFS).

Als Testöfen standen ein Kachelofen, ein Specksteinofen und ein Speicherofen mit Kesseleinsatz zur Verfügung. Am Speicherofen mit Kesseleinsatz konnte das neue Messverfahren auf die Erfassung der direkten Wärmeabgabe an den Raum und an die Zentralheizung ausgetestet werden. Mit jedem der drei Testöfen wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die einen Konditionierungsabbrand sowie mindestens 3 Versuchszyklen umfassten. In einem Versuchszyklus wurde die vom Hersteller angegebene maximal zulässige Holzmenge verbrannt. Der Heizzyklus lag zwischen 12 und 24 Stunden. Die Emissionen in Abgaskamin und Verdünnungstunnel wurden während dem Abbrandzyklus erfasst. Der Abbrandzyklus dauerte vom Entfachen des Feuers bis zum Unterschreiten des CO₂-Wertes von

2 Vol % im Abgas. Die Kalorimeter- und Oberflächentemperaturmessung liefen jeweils bis zum Ende des Heizzyklus weiter.

Für den Specksteinofen und den Speicherofen mit Kesseleinsatz ergaben sich für die direkte wie indirekte Wirkungsgradbestimmung sehr ähnliche Werte. Die Abweichungen lagen zwischen 1.1 % und 2.1 % Wirkungsgradpunkten. Der Wirkungsgrad des Specksteinofens liegt bei gut 70 %, der des Speicherofens mit Kesseleinsatz bei ca. 88 %. Die Unterschiede zwischen der direkten und indirekten Wirkungsgradbestimmung lagen beim Kachelofen bedingt durch Auskühlverluste bei ca. 15 % Punkten. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad lässt sich mit guter Genauigkeit mit der indirekten Wirkungsgradmessung nach CEN/prEN bestimmen. Vergleichende Untersuchungen der CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormenentwürfe am Ökozentrum Langenbruck zeigten, dass die indirekte Wirkungsgradmessung robuster ist als die direkte Messung mit dem Kalorimeterraum.

Für die Erfassung des qualitativen Verlaufs der Heizkurven erwies sich die Temperaturdifferenzmessung in der Zu- und Abluft im Kalorimeterraum als zuverlässig. Beim Specksteinofen verliefen die Oberflächentemperaturen und die kalorimetrisch gemessene Leistung recht synchron. Der konvektive Anteil der Wärmeabgabe führt jedoch zu Abweichungen. Für eine Prüfnorm eignet sich die Oberflächentemperaturmessung nicht, da die Genauigkeit bei der Applikation des Verfahrens auf unterschiedliche Feuerstätten nicht gegeben ist.

Bei Parallelmessungen von Staub im Verdünnungstunnel und im Kamin mit Planfiltern wurden im Verdünnungstunnel ca. 12 % tiefere Staubemissionen ermittelt als im Abgas. Die Streubreiten der Messungen im Verdünnungstunnel und im Abgas überlappten sich jedoch. Die Messung des Staubes im Verdünnungstunnel hat den Vorteil, dass der zu Beginn des Abbrandzyklus wegen der Brennstofffeuchtigkeit auftretende Wasserdampf im Abgas nicht zu Messproblemen führt. Mit dem CFS ergeben sich gewichtete Emissionswerte.

Auf Grund der gewonnenen Erfahrung wurde ein Entwurf für ein neues Messverfahren für Speicheröfen ausgearbeitet. Die wichtigsten Punkte im Prüfnormenentwurf sind:

- Indirekte Wirkungsgradbestimmung über die Messung der thermischen und chemischen Verluste im Abgas.
- Qualitative Bestimmung der Heizkurve durch ein vereinfachtes Temperaturmessverfahren im Kalorimeterraum. Mit der Heizkurve werden die nominelle Heizdauer und die mittlere Heizleistung des Speicherofens bestimmt.
- Emissionsmessung der gasförmigen Schadstoffe (CO und ggf. Stickoxide, NO_x) im Abgas und des Staubs im Verdünnungstunnel.

Mit dem vorliegenden Prüfverfahren wurde eine wichtige Basis für eine Speicheröfen-Prüfnorm gelegt. Bereits konnte dem europäischen Normengremium CEN/TC 295 der Prüfnormenentwurf unterbreitet werden. Ein Ausschuss wird das Prüfverfahren weiter evaluieren. Mit der vorliegenden Arbeit war es möglich, aus der Schweiz rechtzeitig mit Unterlagen für neue Normengrundlagen aufwarten zu können.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Feuerstätten schwerer Bauart zeichnen sich durch den grossen Anteil an Wärmeeinspeicherung im Feststoffspeicher während des Abbrandzyklus aus. Die Wärme wird zeitverzögert über eine längere Zeitdauer vom Feststoffspeicher an den Raum abgegeben. Typische Vertreter von Feuerstätten schwerer Bauart, die wegen dem Intervallbetrieb auch als Zeitbrand-Feuerstätten bezeichnet werden, sind Kachel- und Specksteinöfen. Speicheröfen haben im Alpenraum und in skandinavischen Ländern eine recht grosse Verbreitung. Sie bieten eine gute Effizienz, sind bedienerfreundlich und werden von ihren Betreibern wegen der anhaltenden und behaglichen Wärmeabgabe geschätzt. Feuerstätten schwerer Bauart eignen sich als Ergänzungs- und Ganzhausheizungen und sind bei richtiger Dimensionierung und angepasstem Betrieb auch für den Einsatz in Minergiehäusern geeignet.

1.2 Prüfnormen

Die existierenden Prüfnormen sind auf Feuerstätten leichter Bauart zugeschnitten. Diese Feuerstätten werden in mehrmaligen, unmittelbar aufeinanderfolgenden Abbrandzyklen geprüft. In Ermangelung adäquater Prüfnormen wurden auch Speicheröfen nach diesen Prüfnormen behelfsmässig typengeprüft (z.B. DIN 18891). Dies hat zur Folge, dass die Speicheröfen durch die aufeinanderfolgenden Abbrandzyklen überhitzen und dadurch die Prüfergebnisse nicht den Praxisbetrieb widerspiegeln.

Innerhalb der Europäischen Union (EU) werden zur Zeit Prüfnormen für feststoffbefeuerte Raumheizgeräte mit einer Nennwärmeleistung von ≤ 50 kW ausgearbeitet (CEN/TC 295, Residential solid fuel burning appliances). Die CEN-Normenentwürfe decken u.a. Prüfnormen zur Ermittlung der Emissionen und des Wirkungsgrades der Gerätegruppen Kochherde, Einzelöfen, Cheminées und Kleinkessel ab.

Ausserhalb der Europäischen Union wurden von der Internationalen Normenorganisation (ISO) Prüfnormen für feststoffbefeuerte Raumheizgeräte ausgearbeitet. Die ISO-Normen beinhalten Prüfverfahren zur Bestimmung der Emissionen, der Wärmeleistung und des Wirkungsgrades von Einzelöfen und Cheminées (ISO/TC 116 SC 3, Individual heating appliances).

1.3 Vergleich der Prüfnormenentwürfe CEN/TC 295 und ISO/TC116 SC 3

Der CEN-Normenentwurf (CEN/prEN 13249) [1] geht zur Messung von Wirkungsgrad und Emissionen vom Nennleistungsbetrieb der Feuerstätten aus. Die Emissionsfaktoren basieren auf Emissionsmessungen im Abgas. Der Wirkungsgrad wird indirekt über die Abgasverluste ermittelt, wobei die thermischen Verluste und die unverbrannten Anteile (Kohlenmonoxid, CO) im Abgas berücksichtigt werden.

Der ISO-Normenentwurf (ISO/DIS 13336) [2] verlangt zur Bestimmung von Wirkungsgrad und Emissionen die Messungen der Feuerstätte bei maximaler, minimaler und einer mittleren Abbrandrate. Die Emissionsmessungen erfolgen in einem Verdünnungstunnel. Im Verdünnungstunnel wird der gesamte Abgasstrom mit Umgebungsluft vermischt (Constant Flow Sampling, CFS). ISO fordert lediglich die Gesamtstaubmessung (Total Suspended Particles, TSP). Die Bestimmung weiterer Abgaskomponenten wie z.B. Kohlenmonoxid ist als Option vorgesehen. Heizleistung und Wirkungsgrad werden gemäss ISO/DIS 13336 direkt mittels einer geschlossenen, isolierten Kammer (Kalorimeterraum) mit Aussenluftkühlung gemessen. Die Heizleistung lässt sich aus der Energiebilanz von Zu- und Abluft ermitteln.

Die europäischen und internationalen Normenentwürfe, insbesondere die Methoden der Wirkungsgradbestimmung und Emissionsmessung, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes [3] am Ökozentrum Langenbruck an einem Cheminéeofen untersucht und verglichen. Die mit den beiden

Messverfahren in Parallelversuchen ermittelten Wirkungsgrade und Emissionen unterschieden sich nur geringfügig. Die Unterschiede lagen im Bereich der Messgenauigkeit (Abbildungen 1 und 2).

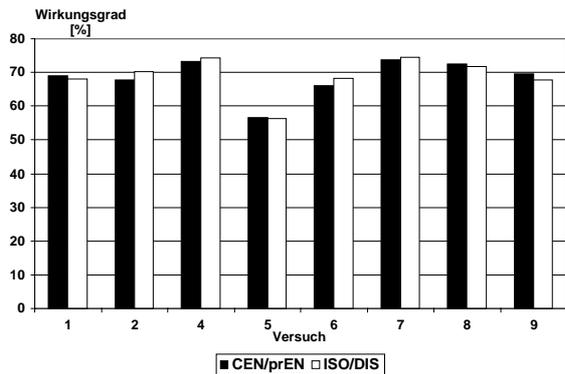


Abbildung 1
Gegenüberstellung der Parallelversuche:
Wirkungsgradmessung nach den Entwürfen der
CEN/prEN- bzw. ISO/DIS-Prüfnormen [3]

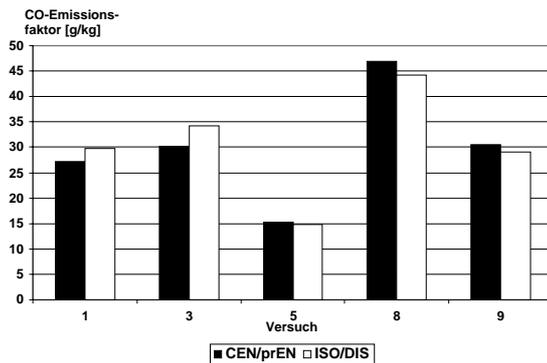


Abbildung 2
Gegenüberstellung der Parallelversuche:
CO-Messung nach den Entwürfen der CEN/prEN-
bzw. ISO/DIS-Prüfnormen [3]

Aufgrund der Vergleichsmessungen kann gesagt werden, dass die Methoden der indirekten (CEN/prEN) sowie der direkten Bestimmung des Wirkungsgrades (ISO/DIS) äquivalent sind. Dieselbe Aussage gilt auch für die Emissionsmessungen im Abgaskamin und im Verdünnungstunnel. Die CEN- und ISO-Messverfahren liefern vergleichbare Resultate für Wirkungsgrad und Emissionen, vorausgesetzt die *Versuchsprozedere* sind identisch. Diese Erkenntnisse waren eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung der Prüfverfahren für Feuerstätten schwerer Bauart.

2 Anforderungen an eine neue Typenprüfung

2.1 Philosophie

Das neue Prüfverfahren soll dem Praxisbetrieb von Speicheröfen möglichst entsprechen und die in-stationären Vorgänge während des Abbrandzyklus berücksichtigen.

Eine neue Typenprüfung muss den Anforderungen der Prüflabors bzw. Prüfstellen wie Reproduzierbarkeit, Laborunabhängigkeit, Messgenauigkeit und Einfachheit der Durchführung nachkommen.

Das Prüfverfahren soll Leistungsdaten hervorbringen, die dem Benutzer einen klaren Vergleich der verschiedenen Geräte und dem Planer die richtige heiztechnische Auslegung ermöglichen.

Die Typenprüfung soll die Hersteller bei der Entwicklung qualitativ hochwertiger Feuerstätten unterstützen sowie ein gutes Preis-Leistungsverhältnis aufweisen.

Für die Grundlagen einer neuen Typenprüfung sollen die bestehenden internationalen (ISO/DIS) und europäischen (CEN/prEN) Prüfnormen möglichst weitgehend einfließen.

2.2 Zielsetzung

Ein neues Prüfverfahren für die Bestimmung von Heizleistung, Wirkungsgrad und Emissionen von Feuerstätten schwerer Bauart (Speicheröfen) war zu entwickeln. Speziell galt es die Möglichkeiten des Kalorimeterraums in Kombination mit dem Verdünnungstunnel zu evaluieren. Einfache Möglichkeiten für die Festlegung von Start- und Abbruchkriterien mussten gesucht werden, die auf die spezifischen Eigenschaften der Speicheröfen zugeschnitten sind. Das neue Verfahren soll Grundlagen für eine neue Typenprüfung liefern mit Messverfahren und Prüfprozederes. Die Prüfergebnisse sollen praxisnahe Gerätekenndaten für Betreiber, Planer, Gewerbe (Hafner) und Behörden liefern.

2.3 Berücksichtigung der Partikelemissionen

Staubmessungen gewinnen auf dem Hintergrund der Problematik der Feinpartikel in der Atemluft an Bedeutung, was sich neu in der Luftreinhalte-Verordnung in der Schweiz aber auch im europäischen Umfeld in den PM 10-Grenzwerten niederschlägt. Um die Partikelmissionen zu reduzieren, muss der Partikelaustritt an den Quellen verringert werden. Holzfeuerungen haben im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern einen höheren Staubpartikelaustritt. Zukünftige Prüfnormen müssen auch Staubpartikelmessungen vorsehen, damit vermehrt Feuerstätten mit geringem Staubaustritt auf den Markt kommen.

3 Versuchsaufbau

3.1 Labormessaufbau

Die Messinfrastruktur im *Labor für nachhaltige Energiesysteme* am Ökozentrum Langenbruck basiert auf den CEN- und ISO-Normenentwürfen und erlaubt die simultane Untersuchung einer Feuerstätte nach den beiden Prüfverfahren. Der Messaufbau zur Erarbeitung der Grundlagen für ein neues Prüfverfahren von Stückholz-Speicheröfen umfasste einen Kalorimeterraum und ein Verdünnungstunnel. In dem isolierten, geschlossenen Kalorimeterraum liess sich direkt Wärmeabgabe und Wirkungsgrad einer Holzfeuerung ermitteln. Aussenluft führte als Kühlluft die von der Holzfeuerung an den Raum abgegebene Wärme aus dem Kalorimeterraum ab. Für Speicheröfen mit Kesseleinsätzen ist ein Wasserkreislauf eingerichtet. Aus der Wärmeabfuhr von Luft und Wasser liess sich die insgesamt nutzbare Wärmeleistung der Holzfeuerung bestimmen. Um den Abbrand nicht zu beeinflussen, war der Luftdruck im Kalorimeterraum auf den Wert des Barometerdruckes geregelt. Ein Feinzugregler (Toleranz ± 0.5 Pa) steuerte den Druck im Raum über ein drehzahlgeregeltes Zuluftgebläse.

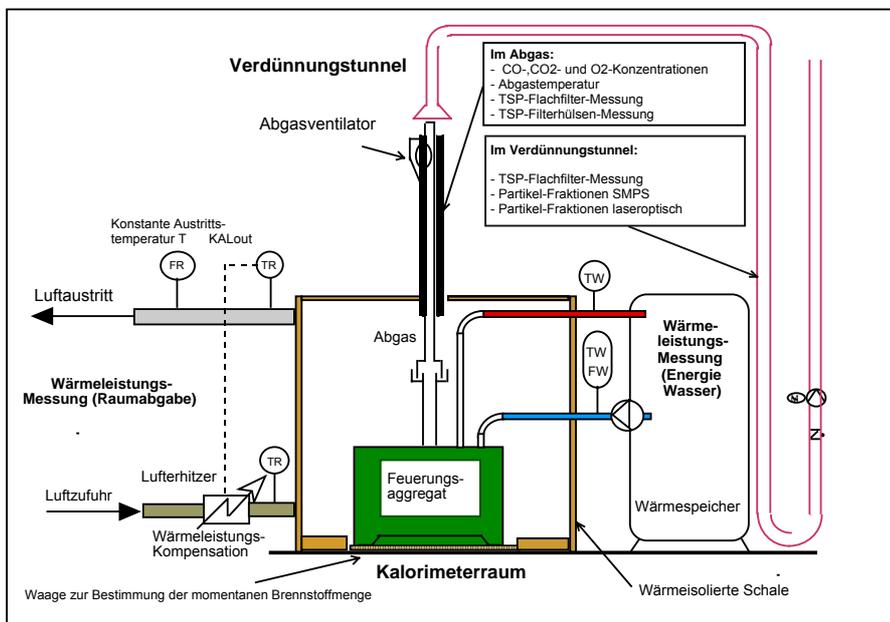


Abbildung 3
Versuchsaufbau:
Kalorimeterraum
für die Wärme-
abgabemessung
mit Abgas-
messstrecke im
Kamin und im
Verdünnungs-
tunnel zur Erfas-
sung der Emis-
sionen; optional
Abgaskessel-
Wärmeleistungsmessung

Die Abgase wurden durch einen Abgaskamin mit konstanter Höhe geleitet. Alle Feuerungen mit und ohne Verbrennungsluft- bzw. Abgasgebläse müssen mit der vorgegebenen Abgaskaminhöhe einwandfrei funktionieren. Der Verdünnungstunnel sammelte die Abgase der Feuerstätte am Ende des Abgaskamins und verdünnte sie mit Umgebungsluft. Ein Ventilator im Verdünnungstunnel sorgte für einen konstanten Volumenstrom (Constant Flow Sampling, CFS).

Die indirekte Wirkungsgradmessung basierte auf den CEN-Normen mit der Erfassung von Abgastemperatur, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt (CO_2 bzw. CO) im Abgas in einer Messstrecke im Kamin.

Mit einer im Kalorimeterraum installierten Waage lässt sich die Gewichtsabnahme des brennenden Holzes feststellen. Mit der Waage lassen sich Anfang und Ende eines Versuchszyklus auf Grund des Brennstoffgewichtes feststellen. Die Auflösung der Spezialwaage ist 20 Gramm bei einem maximal zulässigen Gewicht des Feuerungsaggregates von 3 Tonnen.

3.2 Bestimmung von Wirkungsgrad und Wärmeabgabeleistung bzw. Heizkurve

Die Speicheröfen wurden im Kalorimeterraum installiert. Der Wirkungsgrad wurde sowohl direkt im Kalorimeterraum über die Energiebilanz der Zu- und Abluft wie auch indirekt über die Abgasverluste ermittelt.

Neben der direkten Wärmeabgabemessung der Speicheröfen im Kalorimeterraum wurde ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Wärmeabgabeverlaufes untersucht. Dazu erfolgten Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen der Ofenoberfläche. Die Oberflächentemperaturen erlaubten eine Annäherung der Heizkurve. Zur Messung der Oberflächentemperaturen wurden 7-9 Thermoelemente so am Prüfling platziert, dass die für die Wärmeabgabe massgebenden Flächen durch mindestens eine Messstelle erfasst waren. Für den qualitativen Verlauf der Heizkurve zählte die mittlere Oberflächentemperatur aus den einzelnen Temperaturmessungen gewichtet mit dem Oberflächenanteil. Speziell berücksichtigt wurden auch die Temperaturen der Glasfläche in der Fülltüre sowie der unisolierten Abgasleitung. Diese relativ kleinen Flächen liefern zu Beginn des Abbrandzyklus einen erheblichen Anteil der Wärme.

Die Wärmeleistungsmessung des Kesseleinsatzes erfolgte über den elektronischen Wärmezähler mit integriertem Ultraschall-Durchflussmesser.

3.3 Emissionen

3.3.1 Emissionsmessung im Abgaskamin

Im Kamin war eine Messstrecke nach CEN/prEN-Norm installiert. Im Kamin wurden Abgastemperatur, CO_2 -, CO -Gehalt sowie zusätzlich die Staubpartikelemissionen analysiert. Der Staubpartikelaustritt als Gesamtstaub (TSP) wurde mit Flachfiltern (Abbildung 4) und in einigen Abbrandzyklen in Parallelmessungen mit Flachfiltern und Quarzfilterhülsen erfasst.

3.3.2 Emissionsmessung im Verdünnungstunnel

Parallel zur Abgasmessung im Kamin erfolgte die Gesamtstaubmessung im Verdünnungstunnel.

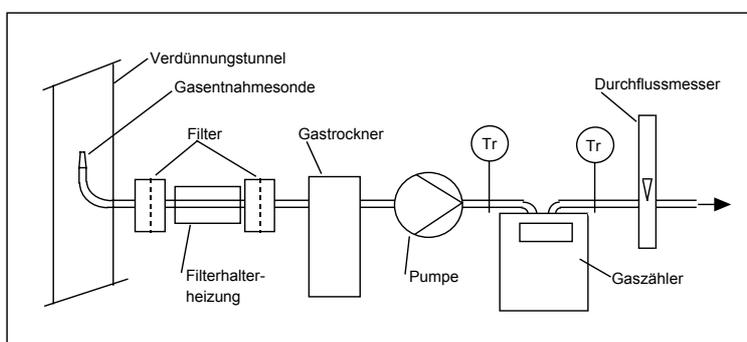


Abbildung 4
Gesamtstaubmessung mit Planfilter (Aufbau basierend auf ISO/DIS-Prüfnormentwurf 13336) im Verdünnungstunnel

Die Staubmessungen basierten auf den Vorgaben des ISO/DIS-Normenentwurfs. Die ISO/DIS-Vorgaben decken sich weitgehend mit den TSP-Messungen nach den US-EPA-Messnormen (US Environmental Protection Agency). Die Filtereinheit besteht aus einer Entnahmesonde sowie dem direkt nachgeschalteten Flachfilter mit Filter und Backup-Filter (Filter-Ø 50mm). Das Probegas wurde isokinetisch abgesaugt.

3.3.3 Partikelverteilung

Ergänzend zur Staubmessung wurden in einigen Versuchen die Feinpartikelfractionen im Bereich zwischen 30 nm - 400 nm (Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS) sowie im Bereich von 400 nm - 20µm (optischer Aerosol-Spektrometer) erfasst. Die Probenentnahme für die Feinpartikelmessung befand sich im Verdünnungstunnel auf der Höhe der Gasentnahmestelle.

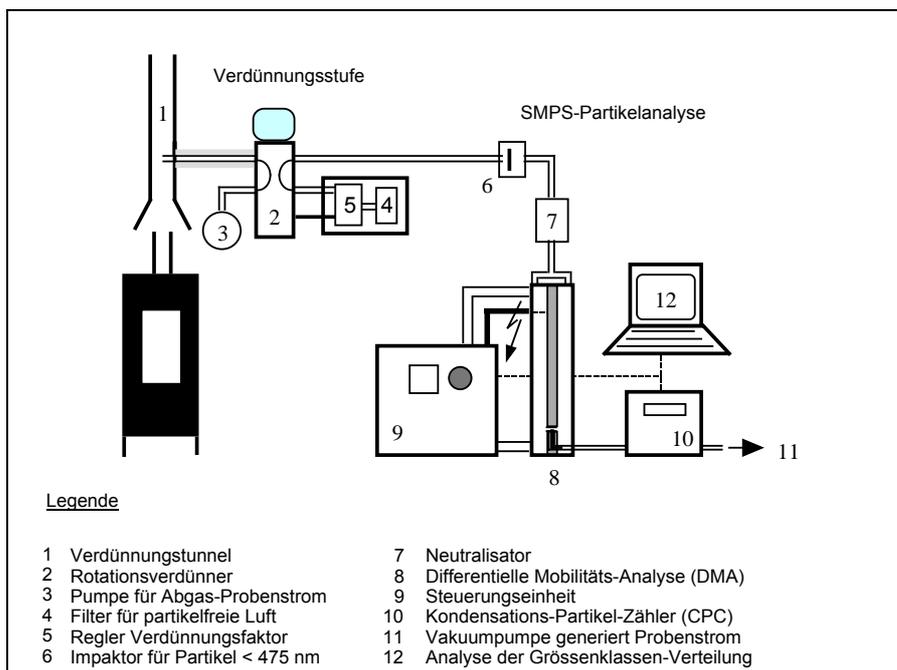


Abbildung 5
Analyse der Feinpartikelverteilung mit Mobilitätsanalyse (SMPS)

4 Versuche

4.1 Versuchsprogramm

Die Evaluation der Messverfahren wurde anhand von drei typischer Vertreter von Stückholz-Speicheröfen in umfangreichen Laborversuchen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf den folgenden Fragestellungen:

- indirekte versus direkte Wirkungsgradbestimmung
- Emissionsmessung im Abgaskamin versus Verdünnungstunnel
- Wärmeleistung aus Abbrandrate versus Wärmeabgabemessung im Kalorimeterraum
- Wärmeabgabe (Heizkurve) mittels Kalorimeterraum oder Oberflächentemperaturmessungen
- Evaluation geeigneter Abbruchkriterien für Emissions- und Wärmeabgabemessungen

Mit jedem der drei Testöfen wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Jede Versuchsreihe umfasste einen Konditionierungsabbrand sowie mindestens 3 Versuchszyklen. Mit dem Konditionierungsabbrand wurde der Speicherofen auf seine Betriebstemperatur gebracht.

Ein charakteristischer Verlauf eines Versuchszyklus findet sich in Abbildung 6.

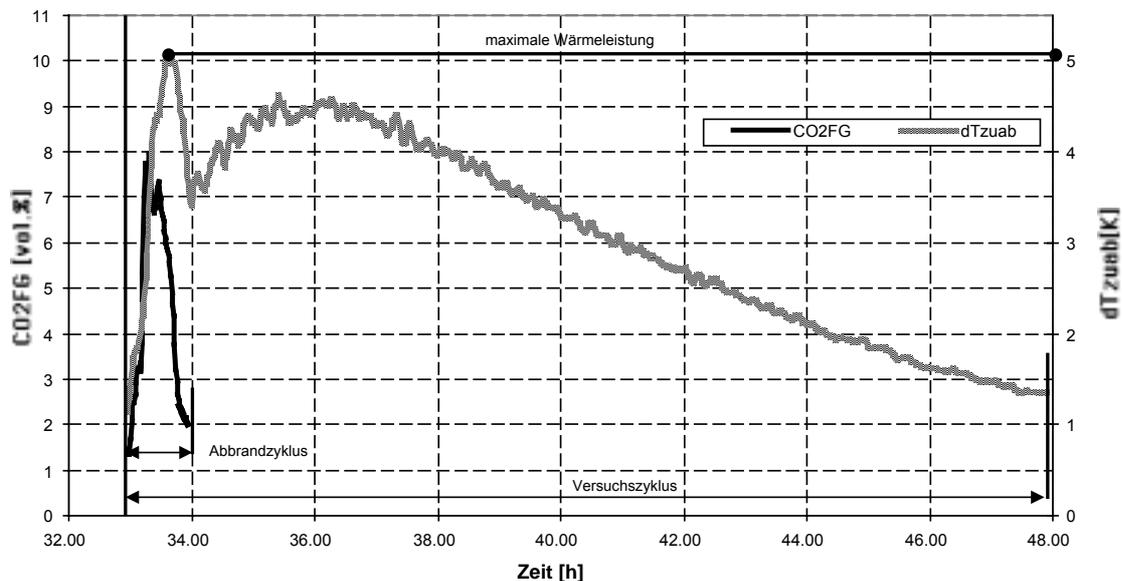


Abbildung 6 Typischer Verlauf eines Prüfzyklus: Abbrand und Wärmeabgabe erfolgen nicht im gleichen Rhythmus.

In einem Versuchszyklus wurde die vom Hersteller angegebene Holzmenge verbrannt. Ein Versuchszyklus dauerte zwischen 12 und 24 Stunden. Eine Versuchsreihe mit Konditionierungsabbrand und 3 Versuchszyklen dauerte 2 bis 4 Tage. Ein neuer Versuchszyklus begann, wenn der Ofen wieder in etwa den gleichen thermischen Zustand erreichte wie zu Beginn des vorangegangenen Versuchszyklus.

Die Emissionen wurden während dem Abbrandzyklus erfasst. Der Abbrandzyklus begann mit dem Entfachen des Holzes und dauerte bis zum Unterschreiten des CO_2 -Grenzwertes von 2 Vol % im Kamin. Die Kalorimeter- und Oberflächentemperaturmessung liefen jeweils weiter bis zum Ende des Versuchszyklus.

4.2 Testöfen

Als Testöfen standen ein Kachelofen, ein Specksteinofen und ein Speicherofen mit Kesseleinsatz zur Verfügung. Der Kachelofen war ein vorgefertigter Ofen des Verbandes Schweizer Hafner- und Plattengeschäfte (VHP) und der Schweizer Kachelofen-Fabrikanten (VSKF). Dieser Ofen wurde bereits im Projekt *Optimierter Klein-Kachelofen* eingehend untersucht. Als Vertreter der Specksteinöfen wurde ein finnisches Serienprodukt für die Untersuchungen eingesetzt. Der Speicherofen mit Kesseleinsatz diente zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des neuen Messverfahrens im Hinblick auf die Erfassung des Energiesplitts zwischen direkter Wärmeabgabe an den Aufstellungsort und an die Zentralheizung.

Tabelle 1 Technische Daten der Testöfen

Typ		Specksteinofen	Kachelofen	Speicherofen mit Kesseleinsatz
Gewicht	[kg]	1150	1500	1100
Brennstoffmenge	[kg]	7.5	10	20
Abbrandart		Durchbrand	Durchbrand	unterer Abbrand
Nominalleistung [kW]:				
- mittlere Heizleistung an den Raum	[kW]	3	2.5	10
- mittlere Heizleistung an Zentralheizung	[kW]			1.2
Heizdauer nach Herstellerangaben	[h]	24	16	24

5 Resultate

5.1 Wirkungsgrad

In den Versuchsreihen wurden parallel die direkten (Kalorimeterraum) und indirekten (Abgasverluste) Wirkungsgrade ermittelt.

Tabelle 2 Feuerungsparameter und ermittelte Wirkungsgrade

		Specksteinofen	Kachelofen	Speicherofen mit Kessel
Brennstoff	[kg]	7.5	9.5	20
mittlere Zeitdauer des Abbrandzyklus	[h]	1.1	0.98	3.8
mittlere Abgastemperatur	[°C]	253	212	156
mittlerer Luftüberschuss	[-]	3.0	3.9	2.0
Wirkungsgrad indirekt (CEN/prEN)	[%]	72.3	71.7	87.9
Wirkungsgrad direkt (ISO/DIS)	[%]	70.2	56.4	89.0

5.2 Heizkurve

Die Heizkurven bilden die Grundlage zur Bestimmung von Heizzyklen und Nennleistungen der Speicheröfen. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den mittels Kalorimeterraum bestimmten Wärmeabgabeverlauf sowie den Verlauf der gewichteten Oberflächentemperatur der Speicheröfen.

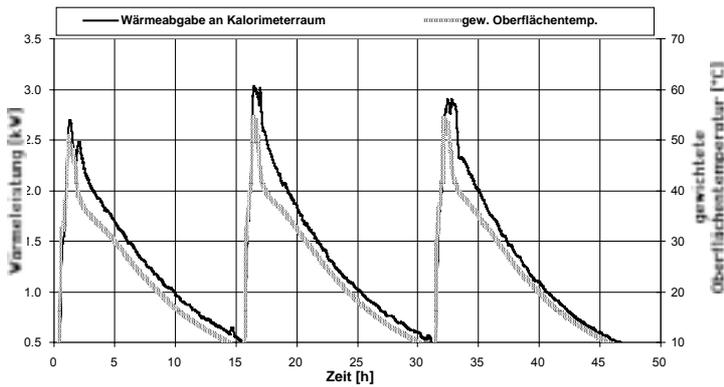


Abbildung 7
Im Kalorimeterraum gemessener Wärmeabgabeverlauf des Specksteinofens über drei Versuchszyklen sowie Verlauf der gewichteten mittleren Oberflächentemperaturen. Das Zeitintervall zwischen identischer Wärmeabgabeleistung bzw. Oberflächentemperatur entspricht der Heizdauer des Gerätes

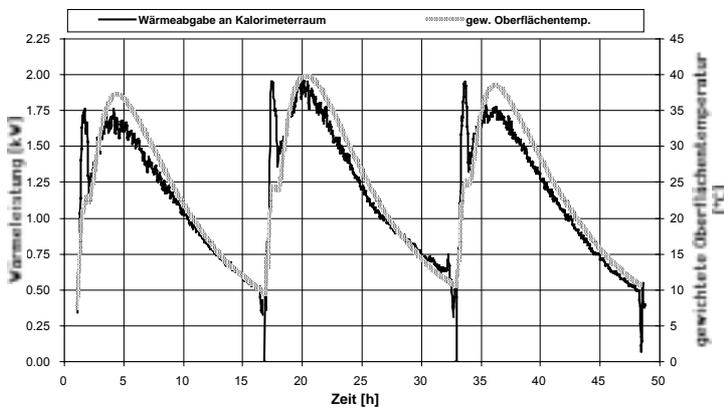


Abbildung 8
Im Kalorimeterraum gemessener Wärmeabgabeverlauf des Kachelofens über drei Versuchszyklen sowie Verlauf der gewichteten mittleren Oberflächentemperaturen. Das Zeitintervall zwischen identischer Wärmeabgabeleistung bzw. Oberflächentemperatur entspricht der Heizdauer des Gerätes

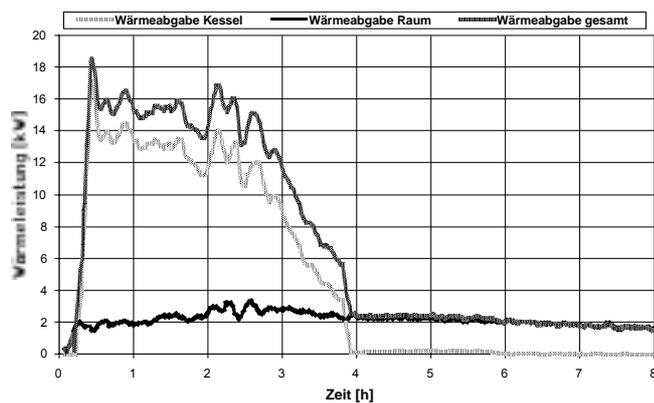


Abbildung 9
Wärmeabgabeverlauf des Speicherofens mit Kesseleinsatz während der Abbrandzeit (bis 4 Stunden). Die Wärmeabgabekurven an den Kessel und an den Kalorimeterraum sind einzeln und als Gesamtleistung aufgezeichnet.

5.3 Emissionen

5.3.1 Gasförmige Emissionen

Auf die Ermittlung der Kohlenmonoxid-Emissionen im Verdünnungstunnel wurde verzichtet, da die Messungen der gasförmigen Emissionen in Abgaskamin und Verdünnungstunnel, wie in [3] dargestellt, äquivalente Resultate liefern.

Tabelle 3 CO-Emissionen im Abgaskamin gemessen (CEN/prEN)

		Specksteinofen	Kachelofen	Speicherofen mit Kessel
CO-Emissionen	[g/m ³] (13 Vol % O ₂)	3.34	2.38	2.0
CO-Emissionsfaktor	[g/kWh]	9.7	5.9	4.9

5.3.2 Staubförmige Emissionen

Die Messungen der Staubemissionen erfolgten über den ganzen Abbrandzyklus. Die Gesamtstaubmessungen wurden im Abgasrohr und im Verdünnungstunnel parallel durchgeführt. Die Partikelverteilung wurde ausschliesslich im Verdünnungstunnel gemessen.

In Tabelle 4 sind die Emissionsfaktoren aus den Versuchen am Specksteinofen als Partikelmasse bzw. -zahl bezogen auf trockenen Brennstoff zusammengestellt.

Tabelle 4 Emissionsfaktoren Specksteinofen

Versuch	Emissionsfaktoren				
	TSP DT ¹⁾ Planfilter	TSP FG ²⁾ Filterhülse	TSP FG ²⁾ Planfilter	PM 0.4 DT ³⁾ SMPS	PM 0.4 DT ³⁾ SMPS
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[#/kg]
Mittelwert	1.49	1.29	1.68	1.49	8.7 * 10 ¹⁶
Minimum	1.24	1.09	1.55	1.68	3.39 * 10 ¹⁶
Maximum	1.83	1.58	1.72	1.12	12.80 * 10 ¹⁶

- 1) TSP DT: Gesamtstaub gemessen im Verdünnungstunnel
- 2) TSP FG: Gesamtstaub gemessen im Abgasrohr
- 3) PM 0.4 DT: berechnete Staubfraktion < 400 nm, Partikelanzahl (#) mit SMPS im Verdünnungstunnel (DT) gemessen; Annahmen: Kugelformen mit Dichte 1500 kg/m³

5.3.3 Feinpartikel

Am Specksteinofen erfolgten auch Messungen der Feinpartikel. Nach dem Anzünden erreicht das Maximum der Partikel-Anzahlkonzentrationen (Most frequent diameter, Mode) Mobilitätsdurchmesser über 100 nm. Das Maximum fällt während dem Abbrand kontinuierlich auf 50 nm mit einer zweiten Mode bei ca. 20 nm (Abbildung 10).

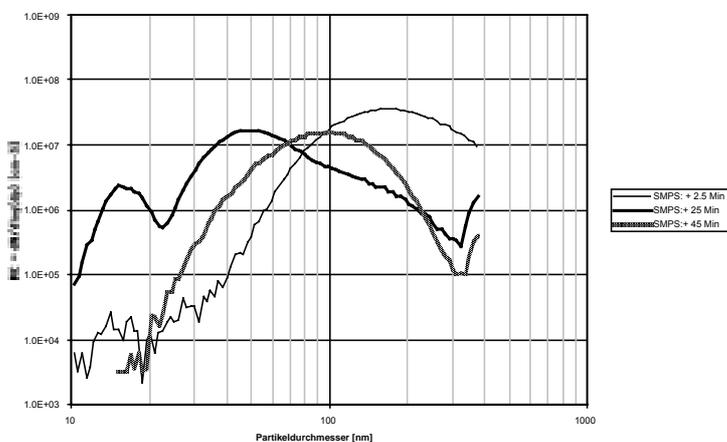


Abbildung 10 Speicherofen: Verteilung der Partikelgrößen (Mobilitätsdurchmesser) gemessen im Verdünnungstunnel mit SMPS während verschiedenen Abbrandphasen

6 Diskussion

6.1 Wirkungsgrade

Für den Specksteinofen wie den Speicherofen mit Kesseleinsatz ergaben sich mit der direkten (Kalorimeterraum) wie indirekten Wirkungsgradbestimmung (Abgasverluste) sehr ähnliche Werte. Die Abweichungen lagen zwischen 1.1 % und 2.1 % Wirkungsgradpunkten. Der Specksteinofen lag bei gut 70 %, der Speicherofen mit Kesseleinsatz bei ca. 88 % Wirkungsgrad.

Für den Kachelofen ermittelten wir mit der direkten Methode einen Wirkungsgrad von nur 56.4 % im Vergleich zu den 71.7 % indirekt bestimmten. Im Versuch wurde an diesem Ofen nach Abbrandende (Abbruchkriterium: $\text{CO}_2 < 2 \text{ Vol } \%$) lediglich die Verbrennungsluftzufuhr an der Feuerraumtür geschlossen. Die Rauchgasklappe im Abgasstutzen blieb jedoch geöffnet. Dies führte zu hohen Auskühlverlusten bedingt durch die Leckluft. Die Auskühlverluste von Speicheröfen reagieren sehr sensibel auf einen undichten Aufbau. Das Schliessen der Abgasklappe nach Abbrandende ist daher sehr wichtig für das Erreichen einer guten Effizienz.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad lässt sich mit guter Genauigkeit über die indirekte Wirkungsgradmessung nach CEN/prEN bestimmen. Erfahrungen in unseren Untersuchungen der CEN/prEN- und ISO/DIS-Prüfnormenentwürfen zeigten, dass die indirekte Wirkungsgradmessung fehlerfreundlicher ist als die direkte Messung im Kalorimeterraum. Wegen der Schwierigkeit, das thermische Gleichgewicht von Versuchszyklus zu Versuchszyklus exakt zu finden, verringert sich die Genauigkeit der direkten Messung bei Speichergeräten.

6.2 Bestimmung der Heizkurve mittels Kalorimeterraum und Oberflächentemperaturen

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den in einem Parallelversuch gemessenen zeitlichen Verlauf der Wärmeabgabe der Speicheröfen im Kalorimeterraum sowie den gewichteten Wert der Oberflächentemperatur. Im Fall des Specksteinofens ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Verläufe. Ebenfalls eine gute Übereinstimmung lässt sich beim Kachelofen feststellen. Beim Kachelofen kann das Messverfahren mit der Oberflächentemperatur die hohe Leistungsabgabe zu Beginn des Heizzyklus nicht richtig nachbilden. Dieser Effekt beruht auf dem grossen Anteil der konvektiven Wärmeabgabe des unisolierten Kaminrohrs.

Für die angenäherte Bestimmung der Wärmeabgabecharakteristik ist das Verfahren der Oberflächentemperaturmessung zulässig. Bei markantem konvektivem Anteil der Wärmeabgabe ist das Verfahren jedoch fehlerbehaftet. Für eine Prüfnorm eignet sich die Oberflächentemperaturmessung nicht, da die Genauigkeit bei der Applikation des Verfahrens auf unterschiedliche Feuerstätten nicht gegeben ist. Einflüsse wie Sichtscheibenanteil, Abgaskanäle und Materialaufbau führen zu unterschiedlichen Messresultaten.

6.3 Emissionen

6.3.1 Gasförmige Emissionen

Zur Ermittlung der gasförmigen Emissionen hat sich die Abgasentnahme im Kamin (entsprechend CEN/prEN 13240) als zuverlässig erwiesen. CEN/prEN gibt Rechenalgorithmen zur Umrechnung der Schadstoffwerte auf der Basis von Konzentrationswerten in Emissionsfaktoren (s. Anhang) an. Im Sinne einer leichten Vergleichbarkeit des Schadstoffauswurfes mit anderen Energieträgern ist die Angabe von Emissionsfaktoren [g/kg oder g/kWh bzw. g/MJ] sinnvoll.

6.3.2 Partikelemissionen

Im Verdünnungstunnel wurden bei der Messung mit Planfiltern ca. 12 % tiefere Staub-Emissionsfaktoren ermittelt als im Abgas. Die Streubreiten der Messungen überlappen sich jedoch.

Kriterien zur Eignung der Messverfahren sind eher praktischer Natur. Es stellte sich heraus, dass wegen der starken Wasserdampfbildung zu Beginn des Abbrandzyklus Kondensationsprobleme an den Filtern am Abgaskamin auftreten. Dieses Problem ist die Folge der Betriebsweise eines Speicherofens, bei dem im kalten Zustand mehrere Kilogramm Brennstoff entfacht werden. Dabei entsteht viel Wasserdampf. Die Beheizung der Flachfilterhalter (ca. 120 °C) konnte dieses Problem nicht zufriedenstellend lösen. Das Problem der Kondenswasserbildung lässt sich durch die Probenahme am Verdünnungstunnel vermeiden.

6.4 Vergleich des neuen Prüfverfahrens mit der geltenden DIN-Prüfnorm

Im DIN-Prüfbericht weist der Specksteinofen einen Wirkungsgrad von 88 % aus. Die Typenprüfung wurde nach DIN 18891 (Prüfnorm für Kaminöfen) durchgeführt. Unsere Messungen nach dem neuen Prüfverfahren (Kaltstart, 7.5 kg Brennstoff ohne Nachlegen von Brennstoff) ergaben dagegen einen Wirkungsgrad von nur ca. 70 % (Tabelle 2). Diese Diskrepanz bewog uns, zum Vergleich einen Versuch entlang den Vorgaben DIN 18891 CEN/prEN durchzuführen.

Dazu wurde der Specksteinofen nach dem DIN-Prozedere mit stark gedrosselter Verbrennungsluftzufuhr betrieben. Bei Erreichen des 2 Vol % CO₂-Wertes im Abgas wurde unmittelbar eine neue Charge von 2 kg Brennstoff auf die Grundglut nachgelegt. Mit diesem Prozedere ermittelten wir ebenfalls 88 % Wirkungsgrad. Auch hier lässt sich feststellen, dass bei identischem Prüfprozedere die Wirkungsgradbestimmung nach dem neuen Prüfverfahren und DIN 18891 CEN/prEN) übereinstimmende Resultate liefert. Da die DIN-Prüfnorm sehr ähnlich den neuen CEN-Normen ist, gilt diese Aussage auch für die zukünftigen CEN/prEN-Normen.

In Abbildung 11 ist der Abbrandverlauf des neuen Prüfverfahrens aufgezeichnet. Im Vergleich dazu findet sich in Abbildung 12 der Abbrandverlauf der DIN-Prüfung.

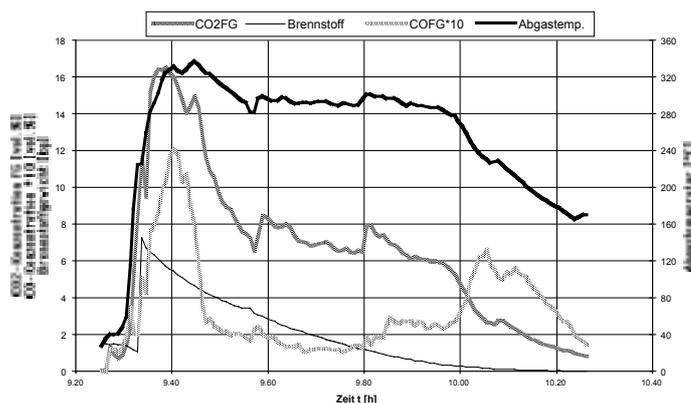


Abbildung 11
Specksteinofen
Messung mit neuem Prüfverfahren:
Abgaswerte und Abbrandrate bei einer
Füllung mit 7.5 kg Brennstoff und 1.5 kg
Anfeuerungsmaterial

Die grosse Wirkungsgraddifferenz zwischen den zwei Versuchen begründet sich hauptsächlich durch die hohe Abbrandrate bei ungedrosseltem Feuer beim praxisnahen neuen Prüfversuch und die damit verbundenen hohen Abgastemperaturen, was zu mehr Abgasverlusten führt.

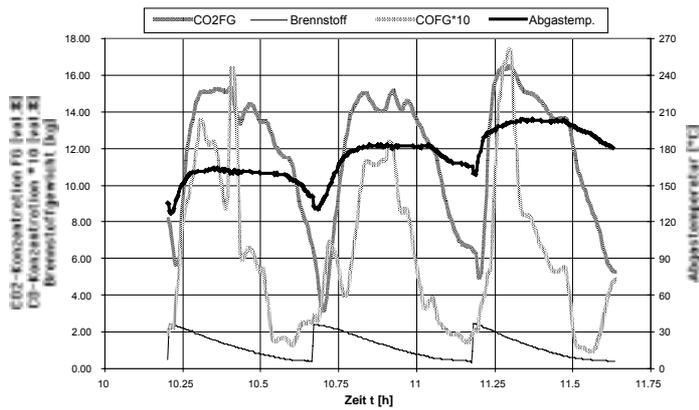


Abbildung 12
 Specksteinofen
 Messung nach DIN-18891 Typenprüfung:
 Abgaswerte und Abbrandrate bei drei auf-
 einanderfolgenden Füllungen à 2 kg Brenn-
 stoff

Die Rücksprache mit dem Hersteller ergab, dass dieser Speicherofen im Normalfall beim Kunden mit weiteren Speicherelementen (z.B. Sitzbank) ergänzt wird. Unter solchen Voraussetzungen ist dann mit einem entsprechend besseren Wirkungsgrad zu rechnen.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Basierend auf den vorliegenden Grundlagenarbeiten konnte ein neues Prüfverfahren für Stückholz-Speicheröfen formuliert werden. Das Prüfverfahren (siehe Anhang) ist zugeschnitten auf den Praxisbetrieb von Speicheröfen. Das neue Verfahren liefert Kenndaten zu Leistung, Wirkungsgrad sowie gas- und staubförmigen Emissionen. Mit den Heizdauer-Klassen wurde eine Kenngrösse zum Speicherungsvermögen der Feuerstätte eingeführt. Mit den Heizdauer-Klassen liegt auch ein Kriterium vor, um zwischen Feuerstätten schwerer (Speicheröfen) und solcher leichter Bauart (z.B. Cheminéeöfen) unterscheiden zu können. Dies ist auch im Sinne des Betreibers, dass ein Speicherofen über eine in der Prüfung ermittelte Zeitdauer eine wirksame Wärmeabgabe aufweist.

Das neue Prüfverfahren baut auf Elementen europäischer (CEN/TC 295) und internationaler (ISO/TC 116 SC 3) Prüfnormentwürfe auf. Der in dem Normenentwurf ISO/DIS 13336 vorgesehene Kalorimeterraum wurde in seiner Anwendung stark vereinfacht. Der Kalorimeterraum wird nicht für die direkte Messung der Wärmeabgabe verwendet, sondern lediglich für die Bestimmung einer Temperaturdifferenz. Mit der Temperaturdifferenzmessung wird lediglich der qualitative Verlauf der Heizleistung erfasst. Mit dieser Messmethode werden Fehlerquellen in der Energiebilanz aufgrund unterschiedlicher Wärmeeinspeicherungen im Ofen zwischen den einzelnen Prüfzyklen ausgeschlossen. Durch die qualitative Erfassung der Heizkurve ergibt sich eine Elastizität im Versuchsablauf, was der Prüflaborpraxis entgegenkommt. Das vorgeschlagene Kriterium für das Prüfzyklusende in einer zulässigen Bandbreite erfordert von der Prüfperson nicht die exakte Kenntnis des thermischen Zustandes des Speicherofens, wie dies bei der direkten Wärmeabgabemessung nach ISO/DIS erforderlich wäre.

Mit der indirekten Bestimmung des Wirkungsgrades über die Abgasverluste können die Auskühlverluste der Feuerstätte nicht erfasst werden. Der indirekt gemessene Wirkungsgrad ergibt lediglich den feuerungstechnischen Wirkungsgrad. Dieser Sachverhalt ist aber unseres Erachtens zulässig, da sich die Auskühlverluste auf die Zeitdauer des Heizzyklus auswirken. Da sämtliche europäischen Feuerstätten-Prüfnormen auch nur die feuerungstechnischen Wirkungsgrade messen, ist so ein unmittelbarer Vergleich unter den verschiedenen Feuerstätten möglich.

Mit dem vorliegenden Prüfverfahren wurde eine wichtige Basis für eine Speicheröfen-Prüfnorm gelegt. Bereits konnte dem europäischen Normengremium CEN/TC 295 der Prüfnormentwurf unterbreitet werden. Ein Ausschuss wird das Prüfverfahren weiter evaluieren. Mit der vorliegenden Arbeit war es möglich, aus der Schweiz rechtzeitig mit Unterlagen für neue Normengrundlagen aufwarten zu können.

Die Schaffung von Prüfverfahren für Holz-Speicheröfen ist auch für die Vergabe von Energie- und Umweltlabels von Bedeutung. Das vorliegende Prüfverfahren wird für die Typenprüfung als Basis des Schweizer Qualitätssiegels für Holz-Feuerstätten vorgeschlagen. Ein entsprechender Antrag an das Entscheidungsgremium erfolgte bereits. Zur Zeit sucht auch ein europäisches Gremium für Qualitätslabel nach Wegen einer Harmonisierung der Prüfmethoden für erhöhte Energie- und Umwelanforderungen an Feuerstätten. Dieses Gremium möchte auch Qualitätslabels für Speicheröfen vergeben können. Da aber entsprechende Prüfverfahren für Speichergeräte fehlen, ist es wichtig, möglichst bald auf europäischer Ebene über Prüfnormen verfügen zu können.

Danksagung

Das Bundesamt für Energie (BFE) förderte diese Entwicklungsarbeit zur Etablierung einer neuen Typenprüfnorm für Stückholz-Speicheröfen. Die Unterlagen bilden eine wichtige Basis für die weiteren Arbeiten in den europäischen Normengremien. Dank der Förderung des Projektes durch das BFE ist es möglich, die Qualitätssicherung von Feuerstätten zu unterstützen, was im Sinne der Branche und der Betreiber ist.

Literaturverzeichnis

- [1] CEN/prEN 13240, Final draft, Residential solid fuel burning appliances, Roomheaters, Requirements and test methods, European Committee for Standardisation (1999)
- [2] ISO/DIS 13336, Draft International Standard (DIS), Solid fuel burning appliances - Test method for determining power output, efficiency and flue gas emissions, International Organization for Standardization (1997)
- [3] C. Gaegauf, Y. Macquat, Die europäischen und internationalen Prüfnormen für Feuerstätten, Bundesamt für Energie (BFE), Schweiz, Schlussbericht November 1999

Anhang

Typenprüfung für Stückholz-Speicheröfen

Vorschlag für eine Prüfnorm zur Bestimmung von
Wärmeleistung, Wirkungsgrad und Emissionen

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	A 20
1.1 Gültigkeit	A 20
1.2 Aussagen	A 20
1.3 Prüfphilosophie	A 20
1.4 Vorgaben	A 20
1.5 Herstellerangaben	A 20
2 Begriffsdefinitionen	A 21
3 Messmethoden	A 22
3.1 Aufbau	A 22
3.2 Qualitativer Verlauf der Heizkurve	A 23
3.3 Wirkungsgrad	A 23
3.4 Emissionen	A 23
4 Prüfprozedere für die heiztechnische Prüfung	A 24
4.1 Konditionierung des Speicherofens	A 24
4.2 Ermittlung der Kennwerte bei Nominallast	A 24
4.3 Ermittlung der Kennwerte bei Teillast	A 25
5 Prüfbrennstoff	A 26
6 Anforderungen	A 26
7 Auswertung	A 26
7.1 Emissionen	A 26
7.2 Wirkungsgrad	A 26
7.3 Heizenergie	A 26
7.4 Nominale Heizdauer	A 26
7.5 Heizdauer-Klasse	A 26
7.6 Mittlere Heizleistung	A 26
7.7 Maximale Heizleistung	A 26
7.8 Feuerungsleistung	A 27
7.9 Leistung des Abgaskessels	A 27
7.10 Leistungsdaten der Typenprüfung	A 28
8 Berechnungsgrundlagen	A 30
8.1 Wirkungsgradberechnung	A 30
8.2 Emissionen	A 30
8.3 Symbolverzeichnis Berechnungsgrundlagen	A 32

8 Grundlagen

8.1 Gültigkeit

Die Prüfnorm ist anwendbar auf Serienprodukte von Stückholz-Speicheröfen. Die Speicheröfen können für die Wärmeabgabe an ein Wasser-Zentralheizungssystem zusätzlich mit einem Abgas/ Wasserwärmetauscher ausgerüstet sein.

8.2 Aussagen

- Die ausgearbeiteten Grundlagen bilden die Basis für Messverfahren und Prüfprozedere zur Bestimmung von Wärmeleistung, Wirkungsgrad und Emissionen von Speicheröfen.
- Die Leistungsdaten liefern Beurteilungs- und Vergleichsgrundlagen für Hersteller, Planer, Gewerbe (Hafner), Betreiber und Behörden.

8.3 Prüfphilosophie

- Das Messverfahren will
 - den Praxisbetrieb von Speicheröfen so weit als möglich nachbilden und
 - den instationären Gegebenheiten des Chargenabbrandes Rechnung tragen.
- Es gilt die Prüflaborpraxis zu berücksichtigen, insbesondere
 - Wiederholbarkeit der Ergebnisse
 - Personenunabhängigkeit
 - Messgenauigkeit
 - einfach zu handhabende Versuchsdurchführung.
- Das Prüfverfahren will die Bestrebung der Branche nach qualitativ hochwertigen Produkten unterstützen.
- Das Prüfverfahren will ein gutes Preis- Leistungsverhältnis aufweisen.
- Das Prüfverfahren orientiert sich an bestehenden Prüfnormen im europäischen (EN-, DIN- und Ö-Normen) und im internationalen (ISO) Umfeld.

8.4 Vorgaben

- Stückholz-Speicheröfen werden nach der Zeitdauer ihrer Wärmeabgabe in Heizdauer-Klassen eingeteilt, die in der vorliegenden Prüfnorm festgelegt sind.
- Um der Geräteklasse *Speicheröfen* zu genügen, muss das Gerät eine vorgegebene minimale Wärmeabgabedauer aufweisen.
- Alle Geräte werden mit einer identischen Kaminhöhe geprüft und müssen mit dem aus der Einheitskaminhöhe resultierenden Naturzug einwandfrei funktionieren. Geräte mit Verbrennungsluft- und/oder Abgasventilator sind auch mit dem Standardkaminaufbau zu prüfen.
- Es gilt die Anforderungen bezüglich Wirkungsgrad und Emissionen unter definierten Betriebszuständen zu erfüllen.

8.5 Herstellerangaben

- Der Hersteller definiert die maximal zulässige Brennstoffmenge für den zu prüfenden Speicherofen.
- Der Hersteller erklärt, ob das Gerät mit Teillast betrieben werden kann. Er gibt die minimal zulässige Brennstoffmenge für den Teillastbetrieb an.
- Die Einstellungen für die Verbrennungsluft etc. während des Prüfzyklus entsprechen den Angaben in der Bedienungsanleitung.

9 Begriffsdefinitionen

Bezeichnung	Abk.	Dimensionen	Erklärungen
Nominallast		-	Prüfzyklus mit nominaler Brennstoffmenge (Vorgabe durch Hersteller).
Teillast		-	Prüfzyklus bei minimal zulässiger Brennstoffmenge (Vorgabe durch Hersteller).
Prüfzyklus		-	Messzyklus zur Erfassung der mittleren Wärmeleistung, qualitativen Heizkurve und nominalen Heizdauer. Der Prüfzyklus beginnt mit dem Entfachen des Anfeuerbrennstoffs und endet bei Erreichen des Abbruchkriteriums basierend auf der qualitativen Heizkurve.
Abbrandzyklus		-	Messzyklus zur Bestimmung der Emissionen und des Wirkungsgrades. Der Abbrandzyklus beginnt mit dem Entfachen des Anfeuerbrennstoffs und endet, wenn der vorgegebene CO ₂ -Gehalt im Abgas als Abbruchkriterium erreicht wird.
Brennstoffmenge		kg	Die Brennstoffmenge setzt sich aus Anfeuerbrennstoff und Prüfbrennstoff zusammen.
Anfeuerbrennstoff		kg	Brennstoff zum Anfachen der Brennstoffcharge; anzugeben als Masse trockener Brennstoff mit Asche.
Prüfbrennstoff		kg	Für die Prüfung zu verwendender Brennstoff definiert durch Anzahl Scheitholz, Perimeter und Wassergehalt; anzugeben als Masse trockener Brennstoff mit Asche.
nominale Brennstoffmenge		kg	Vom Hersteller vorgegebene maximal zulässige Brennstoffmenge.
minimal zulässige Brennstoffmenge		kg	Vom Hersteller vorgegebene minimal zulässige Brennstoffmenge.
nominale Heizdauer	t _N	h	Zeitintervall vom Entfachen des Anfeuerbrennstoffs bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums mit nominaler Brennstoffmenge basierend auf der qualitativen Heizkurve.
Heizdauer-Klassen		h	In der Prüfnorm vorgegebene Zeitintervalle, in die sich der Speicherofen aufgrund seiner erzielten nominalen Heizdauer zuordnen lässt.
Heizenergie		kWh	Erzeugte Wärme des Speicherofens berechnet aus dem Heizwert der Brennstoffmenge und dem Wirkungsgrad.
mittlere Heizleistung		kW	Mittlere Heizleistung des Speicherofens an den Raum in der erzielten Heizdauer-Klasse basierend auf der erzeugten Heizenergie.
Feuerungsleistung		kW	Leistung des Feuers während des Abbrandzyklus berechnet aus dem Heizwert der Brennstoffmenge und dem Abbrand-Zeitintervall.
maximale Heizleistung	P _{max}	kW	Approximierte maximale Wärmeabgabeleistung während des Prüfzyklus ermittelt aus der mittleren Heizleistung und der maximalen Temperaturdifferenzen in der Zu- und Abluft.
Zeitbedarf bis zur max. Heizleistung	t _{pmax}	h	Zeitdauer ab Anfeuern bis maximale Heizleistung erreicht wird.
qualitative Heizkurve		K	Verlauf der Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft im Kalorimeterraum während des Prüfzyklus.
CO-Emissionen		mg/m _n ³	CO-Konzentration im Abgas bei vorgegebenem Sauerstoff (13 % O ₂).

Bezeichnung	Abk.	Dimensionen	Erklärungen
CO-Emissionsfaktor		g/kg	CO-Schadstoffmenge bezogen auf trockenen Brennstoff.
Staubemissionen		mg/m _n ³	Staubkonzentration im Abgas bei vorgegebenem Sauerstoff (13 % O ₂).
Staub-Emissionsfaktor		g/kg	Staub-Schadstoffmenge bezogen auf trockenen Brennstoff.
Wirkungsgrad		%	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad basierend auf dem unteren Heizwert des Brennstoffs.

10 Messmethoden

10.1 Aufbau

Der Speicherofen wird in einem Kalorimeterraum aufgestellt (Abbildung 13). Der Aufbau des Kalorimeterraums basiert auf dem Entwurf der *Internationalen Normenorganisation* ISO/DIS 13336. Im Zu- und Abluftstrom werden die Lufttemperaturen gemessen. Der Luftstrom wird auf einen konstanten Wert eingestellt. Im Gegensatz zum ISO/DIS-Aufbau ist im Kalorimeterraum keine Abbrandwaage installiert, da Speicheröfen ein hohes Eigengewicht aufweisen, was teure Waagen bedingen würde.

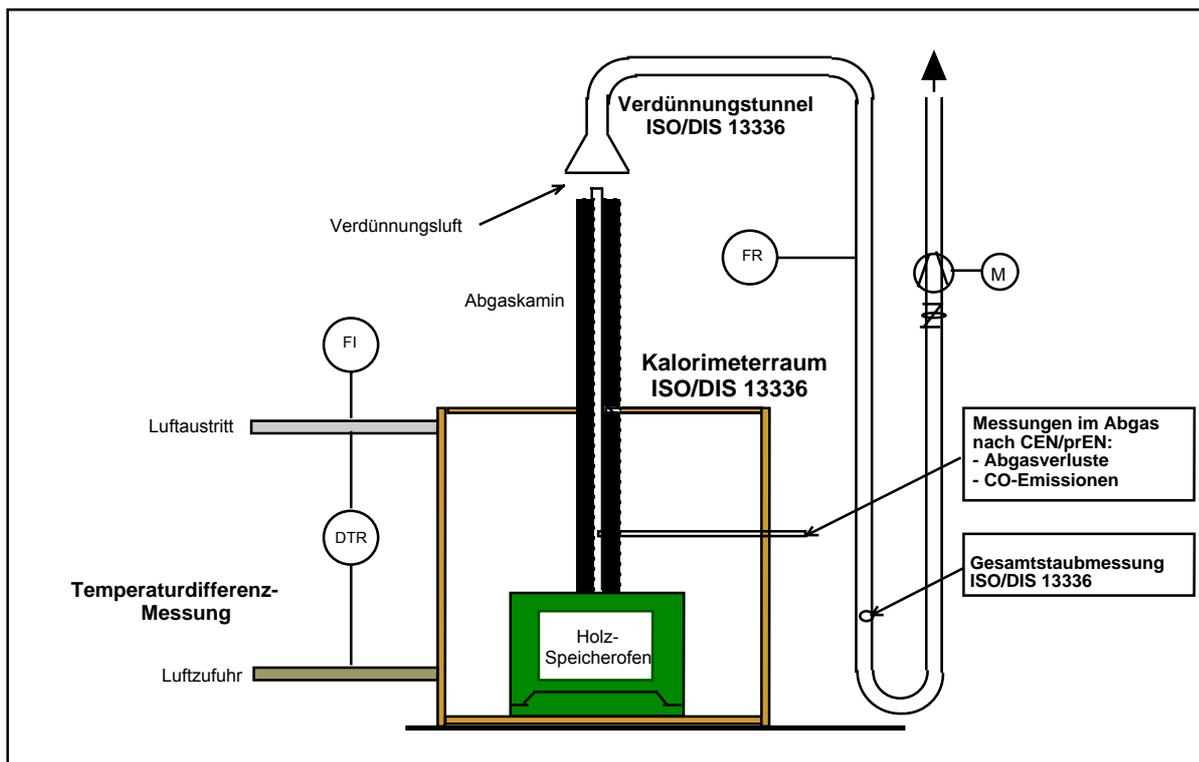


Abbildung 13 Stückholz-Speicherofen im Prüfstand mit Kalorimeterraum (ISO/DIS 13336) zur Erfassung des qualitativen Verlaufs der Wärmeabgabeleistung an den Raum. Abgasmessung zur Bestimmung von Wirkungsgrad und CO-Emissionen (CEN/prEN z.B. 13240). Abgas-Verdünnungstunnel für die Messung der Staubemissionen (ISO/DIS 13336).

Die Abgase der Feuerung werden in ein Abgaskamin mit fest vorgegebener Höhe geleitet. Im Abgaskamin sind Entnahmesonden für die Abgasanalyse (Gaszusammensetzung, Temperatur und Unterdruck) gemäss den Vorgaben der europäischen Prüfnormentwürfe (z.B. CEN/prEN 13240) ange-

bracht. Anschliessend werden die Abgase unter Vermischung mit Umgebungsluft in einen Verdünnungstunnel geleitet, in dem die Staubmessung durchgeführt wird. Der Volumenstrom im Verdünnungstunnel ist auf konstanten Durchfluss geregelt und wird gemessen. Die Wärmeabgabe ans Heizwasser von wasserführenden Speicheröfen kann mit Durchfluss- und Temperaturmessung (Wärmezähler) erfasst werden.

10.2 Qualitativer Verlauf der Heizkurve

Im Gegensatz zur ISO/DIS-Prüfnorm wird der Kalorimeterraum lediglich dazu verwendet, den qualitativen Verlauf der abgegebenen Heizleistung zu erfassen. Der qualitative Verlauf der Heizleistung wird aufgrund der Differenzmessung von Zu- und Ablufttemperatur bestimmt. In Abbildung 14 ist der Verlauf der Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft über drei Prüfzyklen dargestellt.

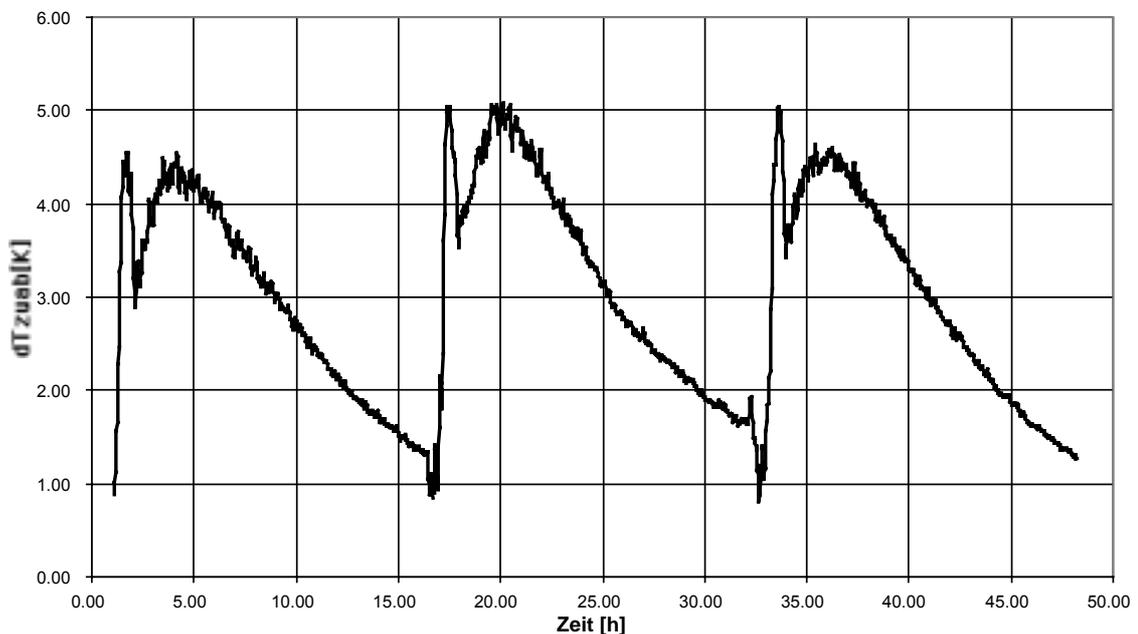


Abbildung 14 Verlauf der Temperaturdifferenz (dT_{zuab}) von Zu- und Abluft im Kalorimeterraum als qualitativer Verlauf der Heizleistung über drei Prüfzyklen eines Speicherofens.

10.3 Wirkungsgrad

Ausgedehnte Untersuchungen zeigten, dass die indirekte Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades einer Feuerung über die Abgasverluste eine zuverlässige Messmethode ist. Die fühlbaren Abgasverluste werden aufgrund der Abgastemperaturen und des Luftüberschusses berechnet. Basis für die Luftüberschussberechnungen liefern die Messungen vom Kohlendioxid- (CO_2) oder Sauerstoffgehalt (O_2) im Abgas. Die chemischen Verluste basieren ausschliesslich auf dem Kohlenmonoxidgehalt (CO) im Abgas.

Die Abgasmessstrecke ist gemäss den Angaben in den Entwürfen der Europäischen Normen (z.B. CEN/prEN 13240) aufgebaut.

10.4 Emissionen

Als Schadstoffe sind Kohlenmonoxid (CO) und Staub (Gesamtstaub) zu messen. Die CO -Emissionswerte liegen von den Wirkungsgradmessungen im Abgas bereits vor. Sie müssen lediglich noch auf

den Normwert bezüglich eines standardisierten Sauerstoffgehaltes umgerechnet werden. Falls erforderlich lassen sich auch zusätzliche Abgaskomponenten wie Stickoxide (NO_x) und Kohlenwasserstoffe (HC) im Abgas analysieren.

Die Staubmessung erfolgt im Verdünnungstunnel (Abbildung 13). Es können Filterhülsen oder Planfilter verwendet werden (Abbildung 15).

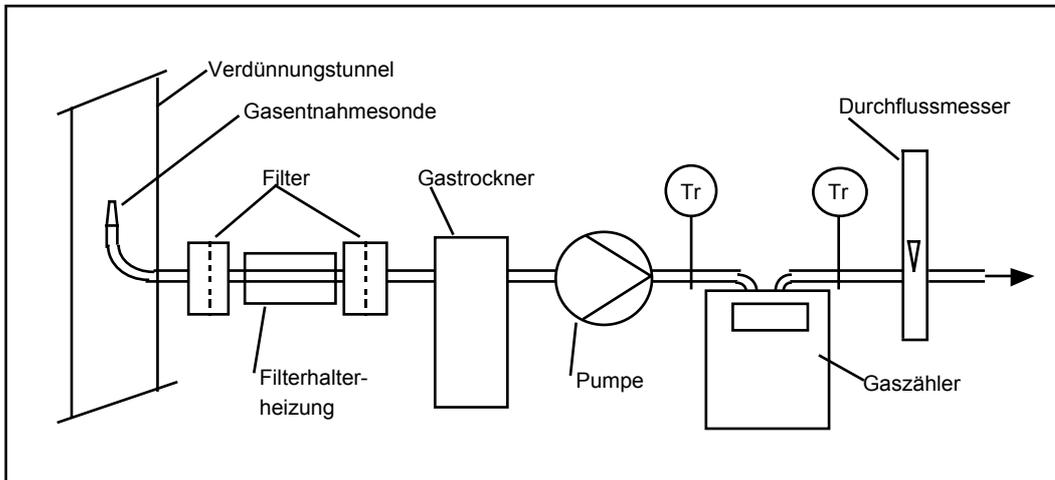


Abbildung 15 Gesamtstaubmessung mit Planfilter (Aufbau basierend auf ISO/DIS-Prüfnormentwurf 13336) im Verdünnungstunnel

Es muss gewährleistet sein, dass eine Staubmessung während des ganzen Abbrandzyklus ohne Unterbruch durchgeführt werden kann.

11 Prüfprozedere für die heiztechnische Prüfung

11.1 Konditionierung des Speicherofens

- Vor den Prüfzyklen wird der Speicherofen für seine wärmetechnische Konditionierung gemäss Herstellerangaben eingefeuert. Die aufzugebende Brennstoffcharge entspricht der vom Hersteller angegebenen maximal zulässigen Brennstoffmenge für einen Abbrand (nominale Brennstoffmenge).
- Wenn die Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft des Kalorimeterraums als Mass für den qualitativen Verlauf der Heizkurve in den Bereich zwischen 25 % und 30 % der maximalen Temperaturdifferenz fällt, ist die Konditionierung des Speicherofens abgeschlossen und es kann mit dem ersten Prüfzyklus begonnen werden. Vor dem Prüfzyklus wird die Brennkammer von Asche- und Brennstoffrückständen gereinigt.

11.2 Ermittlung der Kennwerte bei Nominallast

- Für die heiztechnische Prüfung wird der Speicherofen im Anschluss an die Konditionierung mit der nominalen Brennstoffmenge beschickt.
- Die nominale Brennstoffmenge setzt sich aus dem Anfeuerbrennstoff und dem Prüfbrennstoff zusammen. Die Menge Anfeuerbrennstoff beträgt 10 % der Brennstoffmenge, minimal 500 Gramm.
- Bei Durchbrandfeuerungen soll mit dem Anfeuerbrennstoff ein Vorfeuer entfacht werden. Sobald der Anfeuerbrennstoff intensiv brennt, wird die erforderliche Menge Prüfbrennstoff aufgelegt. Der Prüfbrennstoff darf *maximal in zwei Teilchargen* während des Abbrandzyklus aufgelegt werden. Das Nachlegen wird nach den Angaben des Herstellers durchgeführt.

- Bei Feuerstätten mit Oberabbrand ist der Anfeuerbrennstoff auf dem Prüfbrennstoffstapel zu entfachen.
- Verbrennungsluftklappen sind gemäss Herstellerangaben einzustellen.
- Der Abbrandzyklus beginnt mit dem Entfachen des Anfeuerbrennstoffs und endet, wenn der CO_2 -Gehalt im Abgas während mindestens 5 Minuten 2 Vol % unterschritten hat. Die Messwerte für Wirkungsgrad und Emissionen sind vom Entfachen des Anfeuerbrennstoffs bis zum Erreichen der CO_2 -Abbruchbedingung für die Auswertung aufzuzeichnen und für die Bildung der Mittelwerte zu verwenden.
- Der Prüfzyklus beginnt mit dem Entfachen des Anfeuerbrennstoffs und endet, wenn die Temperaturdifferenz von Zu- und Abluft des Kalorimeterraums als Mass für den qualitativen Verlauf der Heizkurve in den Bereich zwischen 25 % und 30 % der maximalen Temperaturdifferenz fällt. Ist dieses Kriterium erreicht, kann mit einem neuen Prüfzyklus begonnen werden.
- Es sind 3 Prüfzyklen bei nominaler Brennstoffmenge durchzuführen.
- Die Brennkammer ist vor den Prüfzyklen von Asche- und Brennstoffrückständen zu reinigen.
- Für Speicheröfen mit Abgas/Wasserwärmetauscher ist die Wärmeabgabe an das Wasser über den Prüfzyklus zu messen.

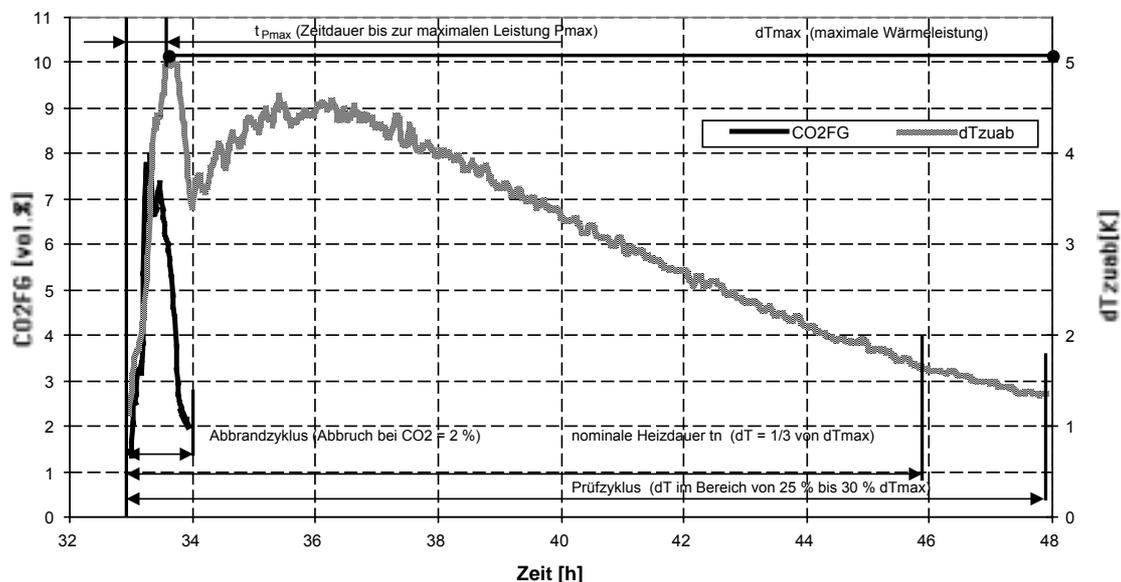


Abbildung 16 Typischer Verlauf eines Speicherofen-Prüfzyklus. Der Abbrandzyklus kann am Verlauf des CO_2 im Abgas (CO_2FG) verfolgt werden. Der qualitative Verlauf der Heizleistung ergibt sich aus dem Verlauf der Temperaturdifferenz (dT_{zuab}) von Zu- und Abluft des Kalorimeterraums.

11.3 Ermittlung der Kennwerte bei Teillast

- Falls der Hersteller das Gerät für Teillastbetrieb als geeignet bezeichnet, soll ein Abbrandzyklus mit der vom Hersteller vorgegebenen minimalen Brennstoffmenge durchgeführt werden.
- Für das Prüfprozedere soll analog dem Abbrand bei Nominallast gemäss Kapitel 11.2 verfahren werden. Es werden beim Teillastbetrieb nur die Emissionen erfasst. Wirkungsgrad und Leistung werden nicht gemessen.
- Verbrennungsluftklappen sind gemäss Herstellerangaben einzustellen.

12 Prüfbrennstoff

Als Prüfbrennstoff sind entrindete Buchenholz-Scheiter zu verwenden. Der Prüfbrennstoff muss Anforderungen bezüglich Wassergehalt, Stückgrösse, Perimeter und Scheiteranzahl gemäss den Vorgaben von ISO/DIS 13336 erfüllen. Die Brennstoffmasse wird immer auf trockenen Brennstoff bezogen.

13 Anforderungen

Die Anforderungen an die Emissionen sind bei Nominallast und Teillast zu erreichen. Die Anforderungen an den Wirkungsgrad gilt es nur bei Nominallast zu erfüllen. Die Prüfwerte bei Nominallast errechnen sich aus den Mittelwerten der drei Prüfzyklen.

14 Auswertung

14.1 Emissionen

Die Emissionen werden als Konzentrationswerte bezogen auf 13 % Sauerstoff in den Abgasen und als Emissionsfaktoren bezogen auf die trockene Brennstoffmenge angegeben. Die Berechnungen der Konzentrationswerte basieren auf den CEN/prEN Prüfnormen z.B. 13240. Die Berechnungen der Emissionsfaktoren sind im Anhang definiert.

14.2 Wirkungsgrad

Die Berechnungen des Wirkungsgrades basieren auf den CEN/prEN Prüfnormen z.B. 13240.

14.3 Heizenergie

Die erzeugte Heizenergie errechnet sich aus der Brennstoffmenge und dem Wirkungsgrad.

14.4 Nominale Heizdauer

Die nominale Heizdauer t_N ergibt sich aus dem qualitativen Verlauf der Heizkurve als Temperaturdifferenz von Zu- und Ablufttemperatur im Kalorimeterraum. Die Zeitdauer vom Entfachen bis zum Unterschreiten von 33 % der maximalen Temperaturdifferenz ist die nominale Heizdauer des Speicherofens. Die nominale Heizdauer ergibt sich aus dem Mittelwert der drei Prüfzyklen.

14.5 Heizdauer-Klasse

Aus der nominalen Heizdauer t_N ergibt sich die Heizdauer-Klasse gemäss folgender Tabelle:

Heizdauer-Klassen						
Bereich der nominalen Heizdauer t_N	$4 \leq t_N \leq 5$	$5 < t_N \leq 7$	$7 < t_N \leq 10$	$10 < t_N \leq 14$	$14 < t_N \leq 20$	$20 < t_N$
Klassen in h	4	6	8	12	16	24

14.6 Mittlere Heizleistung

Mit der Heizdauer-Klasse und der erzeugten Heizenergie wird die mittlere Heizleistung in der Heizdauer-Klasse errechnet.

14.7 Maximale Heizleistung

Die maximale Leistung kann aufgrund des qualitativen Heizkurvenverlaufes bestimmt werden. Die dazugehörige Zeit gibt an, wie rasch die maximale Leistung erreicht wird.

14.8 Feuerungsleistung

Die Feuerungsleistung ergibt sich aus der insgesamt zugeführten Energie der Brennstoffmenge und dem Zeitintervall des Abbrandzyklus.

14.9 Leistung des Abgaskessels

Die Kessel-Heizleistung ergibt sich aus der abgegebenen Wärmemenge während dem Abbrandzyklus (Zeitdauer vom Entfachen bis zum Erreichen der CO_2/O_2 -Abbruchbedingung).

Die insgesamt abgegebene Wärmemenge ergibt sich aus der abgegebenen Wärmemenge während der nominalen Heizdauer.

14.10 Leistungsdaten der Typenprüfung

Kenndaten bei Nominallast				Kenndaten bei Teillast	
Bezeichnung	Dimension	Mittelwerte aus 3 Prüfzyklen	Anforderung	Teillast	Anforderung
Emissionen					
CO-Emissionen	mg/m ³ (13 % O ₂)		≤ 1'800		1'800
CO-Emissionsfaktor	g/kg		≤ 20.8		≤ 20.8
Staubemissionen	mg/m ³ (13 % O ₂)		≤ 80		≤ 80
Staub-Emissionsfaktor	g/kg		≤ 0.925		≤ 0.925
Energie					
Wirkungsgrad	bezogen auf unteren Heizwert		78 %		
Anfeuerbrennstoff	kg		10% von Brennstoffmenge/Min. 500 g		
Prüfbrennstoff	kg		keine		
Brennstoffmenge	kg		keine		keine
total erzeugte Heizenergie	kWh		keine		
nominale Heizdauer	Stunden		≥ 4		
Feuerungsleistung	kW		keine		
mittlere Heizleistung	kW		keine		
maximale Heizleistung	kW		keine		
Zeitbedarf bis zur maximalen Heizleistung	Stunden		keine		
Heizleistung Wasserkessel	kW		keine		
Wärmeabgabe Was-	kWh		keine		

serkessel					
-----------	--	--	--	--	--

Klassifizierung

Heizdauer-Klasse	-	
mittlere Heizleistung	kW	

15 Berechnungsgrundlagen

15.1 Wirkungsgradberechnung

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

Die spezifischen thermischen Abgasverluste (Q_{sth}) bezogen auf die Masse des feuchten Prüfbrennstoffes sind in den CEN/prEN-Prüfnormen nach Gleichung 1 definiert:

$$\text{Gleichung 1} \quad Q_{sth} = (t_{FG} - t_a) \cdot \left(\frac{LHV \cdot (C - Cr)}{0.536 \cdot (CO_{FG} + CO_{2FG})} + \frac{1.92 \cdot (9 \cdot H + MC)}{100} \right) \quad [\text{kJ/kg}]$$

Die auf die Gewichtseinheit des Prüfbrennstoffes bezogenen chemischen Verluste (Q_{sch}) sind Gleichung 2 definiert:

$$\text{Gleichung 2} \quad Q_{sch} = 12'644 \cdot \frac{CO_{FG} \cdot C}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} \cdot \frac{1}{100} \quad [\text{kJ/kg}]$$

Die Abgasverluste bezogen auf die zugeführte Brennstoffenergie ergeben sich aus Gleichung 3 und Gleichung 4.

$$\text{Gleichung 3} \quad q_{th} = \frac{Q_{sth}}{LHV} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\text{Gleichung 4} \quad q_{ch} = \frac{Q_{sch}}{LHV} \cdot 100 \quad [\%]$$

Der gesamte Wirkungsgrad der Feuerstätte ergibt sich mit den thermischen und chemischen Abgasverlusten (Gleichung 5).

$$\text{Gleichung 5} \quad eff = 100 - q_{th} - q_{ch} \quad [\%]$$

15.2 Emissionen

15.2.1 Normierung

Die Mittelwerte der gasförmigen Emissionen wie beispielsweise CO [Vol %] im Abgas werden gemäss CEN/prEN auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas O_{2NORM} von 13 % normiert

$$\text{Gleichung 6} \quad CO_{NORMFG} = CO_{FG} \cdot \frac{21 - O_{2NORM}}{21 - O_{2FG}} \quad [\text{Vol \%}]$$

15.2.2 Emissionsfaktoren der gasförmigen Schadstoffe im Abgas (CEN/prEN)

Die Konzentrationsmessungen der Schadstoffe im Abgas können mit dem folgenden Rechnungsgang auf Emissionsfaktoren umgerechnet werden. Als Beispiel sei das auf der Basis von trockenem Abgas gemessene Kohlenmonoxid (CO) verwendet. Basis bildet dabei die Berechnung des durchschnittlichen trockenen Abgasmassenstromes nach CEN/prEN.

$$\text{Gleichung 7} \quad MFFG_{dry} = \frac{FM}{t} \cdot \frac{1.3}{3.6} \cdot \frac{C}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} \quad [\text{g/s}]$$

Um nun auf den CO-Emissionsfaktor in *Gramm CO/kg Brennstoff trocken* zu berechnen wird die Formel nach Gleichung 7 entsprechend ergänzt zu:

Gleichung 8
$$E_{fact_{CO/kg}} = \frac{100 + MC}{100} \cdot \frac{C}{0.536 \cdot (CO_{2FG} + CO_{FG})} \cdot CO_{FG} \cdot \rho_{CO} \cdot 10 \quad [g/kg]$$

Mit der gemittelten CO-Konzentration und Dichte von CO lässt sich somit direkt der Emissionsfaktor bilden.

Die auf den Brennstoff bezogenen Emissionsfaktoren können nun auf die zugeführte Energie bzw. auf die nutzbare Energie (unter Einbezug des Wirkungsgrades) bezogen werden.

Gleichung 9
$$E_{fact_{CO_{gross}}} = \frac{E_{fact_{CO/kg}}}{LHV} \cdot 3600 \quad [g/kWh]$$

Bezüglich nutzbarer Energie

Gleichung 10
$$E_{fact_{CO_{net}}} = \frac{E_{fact_{CO/kg}}}{LHV} \cdot \frac{eff}{100} \cdot 3600 \quad [g/kWh]$$

15.2.3 Emissionsfaktoren der staubförmigen Emissionen im Verdünnungstunnel

Zur Bestimmung des Emissionsfaktors der Gesamtstaubemissionen muss der wasserfreie und normierte Volumenstrom im Verdünnungstunnel während des Abbrandzyklus bestimmt werden. Der über den Staubfilter abgezogene normierte Volumenstrom wird mit dem Gesamtvolumenstrom im Verdünnungstunnel ins Verhältnis gesetzt. Die errechnete Verhältniszahl wird mit der gemessenen Staubmenge multipliziert. Die so errechnete Staubmenge wird auf die verbrannte, trockene Brennstoffmenge bezogen. Daraus resultiert der auf Brennstoff bezogene Emissionsfaktor.

Gleichung 11
$$E_{fact_{TSP/kg}} = \frac{M_{TSP}}{FM_{dry}} \cdot \frac{V_{DTnorm}}{V_{TSPnorm}} \quad [g/kg]$$

Die auf den Brennstoff bezogenen Emissionsfaktoren können nun gleichfalls auf die zugeführte Energie bzw. auf die nutzbare Energie bezogen werden.

Bezüglich zugeführte Energie

Gleichung 12
$$E_{fact_{TSP_{gross}}} = \frac{E_{fact_{TSP/kg}}}{LHV} \cdot 3600 \quad [g/kWh]$$

Bezüglich nutzbarer Energie

Gleichung 13
$$E_{fact_{TSP_{net}}} = \frac{E_{fact_{TSP/kg}}}{LHV} \cdot \frac{eff}{100} \cdot 3600 \quad [g/kWh]$$

15.3 Symbolverzeichnis Berechnungsgrundlagen

C	Kohlenstoffgehalt des feuchten Brennstoffs	[Gew %]
Cr	Kohlenstoffgehalt des Rostdurchfalls	[Gew %]
CO_{FG}	Volumenanteil Kohlenmonoxid im Abgas (Mittelwert)	[Vol %]
CO_{normFG}	Volumenanteil Kohlenmonoxid im Abgas (Mittelwert) normiert auf 13 % Restsauerstoff	[Vol %]
CO_{2FG}	Volumenanteil Kohlendioxid im Abgas (Mittelwert)	[Vol %]
$E_{factCO/kg}$	Emissionsfaktor in Gramm CO pro kg Brennstoff (trocken)	[g/kg]
$E_{factCO/gros}$	Emissionsfaktor in Gramm CO pro kWh eingesetzter Energie	[g/kWh]
$E_{factCO/net}$	Emissionsfaktor in Gramm CO pro kWh nutzbarer Energie	[g/kWh]
$E_{factTSP/kg}$	Emissionsfaktor in Gramm TSP pro kg Brennstoff (trocken)	[g/kg]
$E_{factTSP/gros}$	Emissionsfaktor in Gramm TSP pro kWh eingesetzter Energie	[g/kWh]
$E_{factTSP/net}$	Emissionsfaktor in Gramm TSP pro kWh nutzbarer Energie	[g/kWh]
eff	feuerungstechnischer Wirkungsgrad auf der Basis LHV	[-]
FM	verfeuerte Brennstoffmenge pro Abbrandzyklus (feucht)	[kg]
FM_{dry}	verfeuerte Brennstoffmenge pro Abbrandzyklus (trocken)	[kg]
H	Wasserstoffgehalt des feuchten Brennstoffs	[Gew %]
LHV	unterer Heizwert des feuchten Brennstoffs	[kJ/kg]
MC	Wassergehalt des Brennstoffs (bezogen feucht)	[Gew %]
$MFFGdry$	Massenstrom des trockenen Abgases	[g/s]
M_{TSP}	gesamte Staubmasse, die im Staubfilter während eines Abbrandzyklus gesammelt wurde	[g]
O_{2FG}	Sauerstoffgehalt im Abgas (Mittelwert)	[Vol %]
O_{2NORM}	Norm Restsauerstoffgehalt im Abgas (hier 13 Vol %)	[Vol %]
Q_{sth}	thermische Abgasverluste bezogen auf feuchten Brennstoff	[kJ/kg]
Q_{sch}	chemische Abgasverluste bezogen auf feuchten Brennstoff	[kJ/kg]
q_{ch}	prozentuale Angabe der chemischen Abgasverluste	[%]
q_{th}	prozentuale Angabe der thermischen Abgasverluste	[%]
t	Abbrandzeit	[h]
t_a	Umgebungstemperatur	[°C]
t_{FG}	Abgastemperatur	[°C]
V_{DTnorm}	gesamtes Gasvolumen, das während eines Abbrandzyklus durch das Verdünnungstunnel strömte (normiert)	[m _n ³]
$V_{TSPnorm}$	gesamtes Gasvolumen, das über die Staubmessung während des Abbrandzyklus abgesogen wurde (normiert)	[m _n ³]
ρ_{CO}	Normdichte von Kohlenmonoxid (1.25 kg/m _n ³)	[kg/ m _n ³]

