

Reihe 15

Umwelttechnik

Nr. 258

Dipl.-Ing. Christian Schäfer,  
Stuttgart

## Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkon- zentration im Abgas von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe



Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration im Abgas von  
Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde des Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Schäfer

aus Stuttgart

Hauptberichter: Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Baumbach

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 26.02.2016

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart

2015



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 15

Umwelttechnik

Dipl.-Ing. Christian Schäfer,  
Stuttgart

Nr. 258

Messgenauigkeit bei der  
Ermittlung der Staubkon-  
zentration im Abgas von  
Kleinfeuerungsanlagen  
für feste Brennstoffe

VDI verlag

Schäfer, Christian

## **Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration im Abgas von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 15 Nr. 258. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

186 Seiten, 52 Bilder, 67 Tabellen.

ISBN 978-3-18-325815-4, ISSN 0178-9589,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Messgenauigkeit – Richtigkeit – Präzision – Messunsicherheit – Standardunsicherheit – Staubkonzentration – Kleinfeuerungsanlagen – Grenzwertüberwachung – Eignungsprüfung – Bundesimmissionsschutzverordnung

Diese Dissertation richtet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Umweltmesstechnik. Sie befasst sich mit der Ermittlung der Staubkonzentration an Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Grundlagen hierfür bilden qualitative und quantitative Begriffe der Messtechnik zur Bewertung der Messgenauigkeit sowie Messverfahren zur Bestimmung der Gesamtausbaukonzentration. Die Bewertung der Messgenauigkeit der Staubmesswerte erfolgt anhand von Labormessungen zur Überprüfung der Richtigkeit und anhand von Prüfstandsmessungen unter realen Abgasbedingungen zur Bewertung der Präzision. Im Fokus steht hierbei die Bewertung der Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration zur Grenzwertüberwachung im Rahmen der ersten Bundesimmissionsschutzverordnung. Anhand einer beispielhaften Eignungsprüfung eines neuartigen Staubmessgerätes, wird die Messunsicherheit bei der Grenzwertüberwachung an Kleinfeuerungsanlagen ermittelt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.





## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart in der Abteilung Reinhaltung der Luft. Meine Hauptaufgaben bestanden in der Emissionsbewertung von Kleinfreuerungsanlagen, der Mitarbeit an der Entwicklung eines neuen Staubmessgerätes und der Optimierung des Referenzmessverfahrens zur Eignungsprüfung neuer Staubmesstechnik, welche zur Grenzwertüberwachung an Kleinfreuerungsanlagen im Rahmen der ersten Bundesimmissionsschutzverordnung eingesetzt werden sollen.

Gefördert wurde meine Arbeit durch die Firma Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, das Umweltbundesamt und die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Für die Förderung meiner Arbeit bedanke ich mich.

Für die Übernahme des Hauptberichtes und die Unterstützung bei meiner wissenschaftlichen Orientierung gebührt mein Dank Herrn Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. G. Baumbach. Ebenso bin ich Prof. Dr. Ing. Michael Schmidt für die Übernahme des Mitberichtes dankbar. Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht danke ich für die mir gebotenen Möglichkeiten am IFK meine Dissertation verwirklichen zu können.

Für die fachliche Unterstützung möchte ich mich besonders bei Dr. Michael Struschka und Dr. Stephan Ester bedanken. Die ausgezeichnete Teamarbeit und die inspirierenden Sachdiskussionen empfand ich stets als eine persönliche Bereicherung. Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Arbeitskollegen am Institut für das freundliche Arbeitsklima und bei allen nicht namentlich erwähnten Helfern und Studenten, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern Danke ich für Ihre Unterstützung während meiner Ausbildungs-, Schul-, und Studienzeit, Ihren Rat und das in mich gesetzte Vertrauen. Hervorheben möchte ich den Dank an meine Frau und meine Tochter für die Liebe, welche mich stets stärkt. Die Geduld und das Verständnis meiner Frau, die mir an langen Wochentagen, Feierabenden und Urlaufen den Rücken freigehalten hat.

Christian Schäfer

Stuttgart den 06.03.2016



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Begriffsdefinitionen .....	VIII
Abkürzungsverzeichnis .....	X
Kurzfassung.....	XIV
Abstract .....	XV
1 Einführung .....	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
3 Staubemissionen aus Kleinfuerungsanlagen für feste Brennstoffe und deren messtechnische Bestimmung.....	8
3.1 Einflussfaktoren auf die Staubemissionen aus Kleinfuerungsanlagen .....	8
3.2 Zusammensetzung und Bildung von Partikeln aus Kleinfuerungsanlagen .....	15
3.3 Messtechnische Herausforderungen bei der Bestimmung der Staubmasse .....	21
4 Stand der Technik und Gesetzgebung für Staubmessungen an Kleinfuerungsanlagen.....	25
4.1 Stand der Technik.....	25
4.1.1 Das Referenzmessverfahren .....	25
4.1.2 Isokinetische Probenahme .....	26
4.1.3 Partikelverlust bei der Probenahme .....	29
4.1.4 Messverfahren zur Bestimmung der Staubemissionen.....	30
4.2 Gesetzliche Vorgaben und Richtlinien für Messungen an Kleinfuerungsanlagen.....	33
4.2.1 Die Europäische Luftqualitätsrahmenrichtlinie .....	33
4.2.2 Das Bundesimmissionsschutzgesetz.....	33
4.2.3 Die gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung .....	34
4.2.4 Eignungsprüfung für Messgeräte zur Überwachung der Staubemissionen.....	37
5 Begriffe und Grundlagen der Messstatistik .....	45
5.1 Prüfung, Verifizierung und Validierung .....	45
5.2 Qualitative und quantitative Begriffe zur Beurteilung der Messgenauigkeit.....	46
5.3 Die Gauß'sche Normalverteilung.....	48

6	Angewandte Methoden zur Bewertung der Messgenauigkeit .....	50
6.1	Methoden zur Bewertung der Präzision .....	50
6.1.1	Indirekte Ermittlung der Standardunsicherheit.....	50
6.1.2	Direkte Ermittlung der Standardunsicherheit anhand von Doppelbestimmungen	52
6.2	Methoden zur Bewertung der Richtigkeit .....	55
6.2.1	Verifizierung des Referenzmessverfahrens .....	55
6.2.2	Validierung neuer Staubmessgeräte .....	56
7	Messaufbau und Anpassung des Referenzmessverfahrens für Messungen an Kleinfreuerungsanlagen .....	59
7.1	Aufbau der Messeinrichtungen .....	59
7.2	Angepasste Verfahrensdurchführung des Referenzmessverfahrens .....	61
7.2.1	Probenahme der zu bestimmenden Staubmasse .....	61
7.2.2	Die Probenahmetemperatur .....	64
8	Messgenauigkeit des Referenzmessverfahrens an Kleinfreuerungsanlagen.....	67
8.1	Prüfung auf Richtigkeit der Messwerte.....	68
8.2	Bewertung der Präzision der Messwerte .....	71
8.2.1	Theoretische Berechnung der Messunsicherheit .....	71
8.2.2	Ermittlung der Messunsicherheit unter realen Abgasbedingungen .....	74
8.2.3	Messunsicherheit in Abhängigkeit der Brennstoffe und Feuerungsanlagen .....	77
8.2.4	Vergleich der Ermittlungsmethoden zur Bestimmung der Messunsicherheit .....	83
8.3	Bewertung der Messgenauigkeit des Referenzmessverfahrens .....	85
9	Validierung neuer Staubmessgeräte zur Grenzwertüberwachung an Kleinfreuerungsanlagen.	88
9.1	Methodik zur Validierung neuer Staubmessgeräte .....	89
9.2	Anforderungen an quantitative Bewertungsgrößen im Rahmen der Validierung .....	93
9.2.1	Anforderungen an die Messgenauigkeit des Referenzmessverfahrens .....	93
9.2.2	Anforderung an die Messgenauigkeit der zu prüfenden Messgeräte.....	95
9.3	Messgenauigkeit des Referenzmessverfahrens .....	96
9.4	Messgenauigkeit des zu prüfenden Messgerätes.....	101
9.5	Bewertung der Validierungsergebnisse.....	105

10 Prüfung der Notwendigkeit einer isokinetischen Probenahme.....	109
10.1 Theoretische Betrachtung zur Korrektur der Messwerte .....	109
10.2 Experimentelle Untersuchungen an Kleinfeuerungsanlagen .....	111
10.3 Experimentelle Untersuchungen an der Emissionssimulationsanlage .....	115
10.3.1 Untersuchungen mit dem Referenzmessverfahren .....	116
10.3.2 Untersuchungen mit dem Messgerät Wöhler SM 500.....	118
10.4 Schlussfolgerungen für Messungen an Kleinfeuerungsanlagen.....	120
11 Messgenauigkeit von Staubmessungen an Kleinfeuerungsanlagen und Maßnahmen zu deren Erhöhung .....	121
12 Zusammenfassung .....	124
13 Anhang .....	127
Anhang A Relevante Stellen in Gesetzen, Richtlinien und Normen.....	128
Anhang B Messungen an der Emissionssimulationsanlage.....	132
Anhang C Theoretische Berechnung der Messunsicherheit .....	134
Anhang D Ermittlung der Messunsicherheit unter realen Abgasbedingungen.....	142
Anhang E Das zu prüfende Staubmessgerät .....	148
Anhang F Messwerte im Rahmen der bespielhaften Validierung.....	149
Anhang G Experimentelle Untersuchungen zur isokinetischen Probenahme.....	158
Anhang H Der Niederdruckimpaktor .....	161
14 Literatur .....	163

# Begriffsdefinitionen

Begriff	Definition
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	Kennwert, der einen Bereich um das Messergebnis y kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnten [1].
<b>Messabweichung</b>	<i>„Abweichung eines aus Messungen gewonnen und der Messgröße zugeordneten Wertes vom wahren Wert“</i> [2]
<b>Messgenauigkeit</b>	<i>„Das Ausmaß der Annäherung zwischen einem Ermittlungsergebnis und dem anerkannten Bezugswert.“</i> <u>Anmerkung:</u> „Wird der Ausdruck "Genauigkeit" auf eine Serie von Ermittlungsergebnissen angewendet, umfasst er eine Kombination von Zufallskomponenten sowie eine gemeinsame systematische Abweichung oder eine gemeinsame Abweichungskomponente.“ [3]
<b>Messgröße</b>	<i>„Physikalische Größe, der die Messung gilt“</i> [2]
<b>Messung</b>	<i>„Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit.“</i> [2]
<b>Messunsicherheit</b>	<i>„Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnten.“</i> [1]
<b>Messwert</b>	<i>„Wert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist“</i> [2]
<b>Präzision</b>	<i>„Das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen unabhängigen Ermittlungsergebnissen, die unter festgelegten Bedingungen gewonnen sind.“</i> <u>Anmerkung 1:</u> „Präzision hängt ausschließlich von der Verteilung zufälliger Abweichungen ab und bezieht sich nicht auf den wahren oder den vorgegebenen Wert.“ <u>Anmerkung 2:</u> Das Präzisionsmaß wird üblicherweise damit ausgedrückt, "wie unpräzise etwas ist". Errechnet wird es als Standardabweichung der Ermittlungsergebnisse...“ [3]
<b>Prüfung</b>	<i>„Feststellen, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt“</i> [2]
<b>Referenzmessverfahren</b>	<i>„Messverfahren (-methode), das (die) per Konvention den anerkannten Referenzwert der Messgröße liefert“</i> [4]

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<b>Referenzwertabweichung</b>	Messabweichung eines Messmittels zu einem festgelegten Wert, welcher zur Prüfung des Messmittels ausgewählt wurde. [5]
<b>Relative Messunsicherheit</b>	„ <i>Messunsicherheit, bezogen auf den Betrag des Messergebnisses</i> “ [2]
<b>Relative Standardunsicherheit</b>	Standardunsicherheit, bezogen auf den Betrag des Messergebnisses
<b>Richtige Wert bzw. Referenzwert</b>	„ <i>Bekannter Wert für Vergleichszwecke, dessen Abweichung vom wahren Wert für den Vergleichszweck als vernachlässigbar gilt.</i> “ [2]
<b>Richtigkeit</b>	<p>„<i>Das Ausmaß der Annäherung zwischen dem Mittelwert aus einer großen Serie von Ermittlungsergebnissen und einem anerkannten Bezugswert.</i>“</p> <p><u>Anmerkung 1:</u> Das Richtigkeitsmaß wird üblicherweise ausgedrückt mittels einer systematischen Abweichungskomponente.</p> <p><u>Anmerkung 2:</u> Richtigkeit wurde früher als „<i>Genauigkeit des Mittelwerts</i>“ bezeichnet. Diese Benennung wird nicht empfohlen.“ [3]</p>
<b>Standardabweichung</b>	„ <i>positive Quadratwurzel der Varianz.</i> “ [1]
<b>Standardunsicherheit</b>	„ <i>als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung</i> “ [1]
<b>systematische Messabweichung</b>	Eine systematische Messabweichung bleibt in jeder Reihe von Beobachtungen gleich. Sie kann bei mehrmaliger Durchführung der Messung ermittelt werden. Eine systematische Abweichung wird auch als Bias bezeichnet. Vergleiche hierzu die Definition von Richtigkeit. [1]
<b>Validierung</b>	„ <i>Bestätigen aufgrund einer Untersuchung und durch Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Forderungen für einen speziellen, beabsichtigten Gebrauch erfüllt worden sind.</i> “ [6]
<b>Verifizierung</b>	„ <i>Bestätigen aufgrund einer Untersuchung und durch Bereitstellen eines Nachweises, dass festgelegte Forderungen erfüllt worden sind.</i> “ [6]
<b>Wahre Wert</b>	„ <i>Wert der Messgröße als Ziel der Auswertung von Messungen der Messgröße</i> “ [2]
<b>zufällige Messabweichung</b>	Einfluss, der eine zufällige Streuung mit einem zufälligen Wert in einer Reihe von Messungen verursacht. Sie kann bei mehrmaliger Durchführung der Messung ermittelt werden. Siehe hierzu die Definition von Präzision [1]

## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Formelzeichen (lateinisch)</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
a	-	Zusätzliche Abweichung
B	-	Barth'sche Ähnlichkeitszahl
c	mg/m <sup>3</sup>	Staubkonzentration
cov	-	Kovarianz
d	m	Durchmesser
E	-	Eingangsgröße
e	-	Empfindlichkeitskoeffizient
f	%	Feuchtegehalt
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
k	-	Anzahl der Eingangsgrößen
m	kg	Masse
N	-	Anzahl der Messwerte
p	hPa	Druck
Q	%	Qualitätsanforderung
R <sup>2</sup>	-	Bestimmtheitsmaß
s	mg/m <sup>3</sup>	Präzisionsvorgabe
T	K; °C	Temperatur
u	-	Absolute Unsicherheit
var	-	Varianz
V	m <sup>3</sup>	Volumen
·V	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
W	%	Erweiterte relative Messunsicherheit
w	%	Relative Messunsicherheit
X		Mögliches Messergebnis
x	-	Messwert
z	-	z- Score Wert

---

---

<b>Indizes</b>	<b>Bedeutung</b>
A	Abweichung
atm	Bedingungen der Atmosphäre bzw. Luft
D	Durchführung von Doppelbestimmungen
Drift	Unsicherheitsbeitrag durch eine Drift
E	Entnahmesonde
F	Fluid
H	Hauptvolumenstrom
I	Indirekte Ermittlungsmethode bzw. klassische Fehlerrechnung
i	Anzahl i
i.N.	In Normbedingungen (trocken, T=273,15 K, p=1013,25 hPa)
j	Anzahl j
Kanal	Bedingungen im Messkanal
k	Anzahl k
Kal	Kalibrierung
L	Anzahl L
M	Messunsicherheit
Mean	Unsicherheitsbeitrag durch Temperaturschwankungen
Mess	Bedingungen am Volumenstrommessgerät
m	Mit Spülanteil
N	Anzahl
norm	Normgröße
o	Ohne Spülanteil
P	Zu prüfendes Messgerät
p	Partikel
R	Richtigkeit bzw. Referenz
r	Rückwägung bzw. Zweitwägung
Rep	Wiederholstandardabweichung
Res	Auflösung der Anzeige
S	Standardunsicherheit

Fortsetzung auf der nächsten Seite

St	Stokes
s	Staub
Sys	Systematik
T	Teilvolumenstrom
V	Vergleichsmessungen mit einem Referenzmessverfahren
v	Erstwägung bzw. Vorwägung

---

Formelzeichen (griechisch)	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	-	Unsicherheitsbeitrag
$\varepsilon$	-	relativer Staubgehalt
$\omega$		Sinkgeschwindigkeit
$\Delta$	-	Differenz
$\eta$	kg/(m*s)	Dynamische Viskosität
$\mu$	-	Mittelwert
$\nu$	-	Freiheitsgrade
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\S$	-	Paragraph
$\Phi$	-	Dichtefunktion (Normalverteilung)
$\Omega$	%	Wahrscheinlichkeit
$\delta Y_j$	mg/m <sup>3</sup>	Zusätzliche Abweichung

---

<b>Abkürzungen</b>	<b>Bedeutung</b>
BlmSchV.	<u>Bundesimmissionschutzverordnung</u>
BS	<u>Brennstoff</u>
CEN	<u>Comité Européen de Normalisation</u> (Europäisches Komitee für Normung)
DIN	<u>Deutsche Industrie Norm</u>
EG	<u>Europäische Gemeinschaft</u>
EN	<u>Europäische Norm</u>
ESA	<u>Emissionssimulationsanlage</u>
GK	<u>Geräteklaasse</u>
GW	<u>Grenzwert</u>
GWK	<u>Grenzwertklasse</u>
HLUG	<u>Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie</u>
ISO	<u>International Organization for Standardization</u>
i.N.	<u>In Normbedingungen</u> (trocken, T=273,15 K, p=1013,25 hPa)
LPI	<u>Low Pressure Impaktor</u>
N	Anzahl
PM	<u>Particulate Matter</u>
RM	<u>Referenzmesseinrichtung</u>
TS	<u>Technische Spezifikation</u>
VDI	<u>Verein Deutscher Ingenieure</u>
VP	<u>Verbrennungsphase</u>

---

## Kurzfassung

Betreiber, Feuerungsanlage und Brennstoff beeinflussen die Staubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen. Die vorliegenden Partikel unterscheiden sich in Größe, Form und Zusammensetzung. Als Referenzmessverfahren für Staubemissionsmessungen wird die gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein direkt gravimetrisches Messverfahren. Größe, Form und Zusammensetzung der Partikel spielen bei diesem Verfahren nur eine untergeordnete Rolle.

Die Messgenauigkeit dieses Referenzmessverfahrens war bisher für dessen Anwendung an Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe nicht bekannt. Zunächst wurde in dieser Arbeit die Verfahrensdurchführung für Messungen an diese Anlagen angepasst. Anschließend wurde die Messunsicherheit des Verfahrens sowohl theoretisch berechnet als auch praktisch unter realen Abgasbedingungen ermittelt. Um eine möglichst große Bandbreite an praxisnahen Verbrennungs- und Messbedingungen abzudecken, wurden hierzu unterschiedliche Feuerungsanlagen und Brennstoffe eingesetzt. Über alle Verbrennungs- und Messbedingungen ergibt sich eine Messunsicherheit von 7,3%. Die Richtigkeit der Messwerte wurde anhand von Verifizierungsmessungen an einer Emissionssimulationsanlage nachgewiesen. Anhand der unter einer großen Bandbreite an realen Abgasbedingungen ermittelten Messunsicherheit und dem Nachweis auf Richtigkeit der Messwerte liegen erstmalig Informationen über die Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration an Kleinfeuerungsanlagen vor.

Auf Basis statistischer Methoden zur Bewertung der Messgenauigkeit und der Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen für aktuelle Normen und Richtlinien wurde eine Methodik entwickelt, anhand derer neue Staubmessgeräte zukünftig validiert werden können. Im Rahmen einer beispielhaften Validierung eines neuen Staubmessgerätes wurde eine Messunsicherheit dieses Messgerätes von 15% ermittelt, ein neuer Stand bei Messungen zur Grenzwertüberwachung an Kleinfeuerungsanlagen konnte definiert werden.

Zusätzlich wurde anhand experimenteller Untersuchungen zur isokinetischen Probenahme nachgewiesen, dass Auswirkungen einer nicht-isokinetischen Probenahme an Kleinfeuerungsanlagen vernachlässigt werden können. Um die Messgenauigkeit der Messwerte zu erhöhen, wird empfohlen, künftig auf eine isokinetische Probenahme zu verzichten, um stattdessen möglichst viel Staubmasse zu sammeln und ein möglichst großes Probenahmenvolumen abzusaugen.

## Abstract

Operators, furnace and fuel influence the dust emissions from small-scale furnaces. The present particles vary in size, shape and composition. As a reference method for dust emission measurements the gravimetric determination of dust load is used. This is a direct gravimetric measuring method. Size, shape and composition of the particles play only a subordinate role in this measuring method.

The accuracy of this reference method was not previously known for its use at small-scale furnaces for solid fuels. First, the process carried out for measurements on these furnaces has been adapted in this work. Subsequently, the uncertainty of the measurement method was calculated theoretically as well as determined practically under real flue gas conditions. In order to cover a wide range of practical combustion and measuring conditions different combustion systems and fuels have been used. About all combustions and measuring conditions the results for the measurement uncertainty is 7.3%. The accuracy of the measured values has been demonstrated during verification measurements on an emissions simulation facility. Based on the determined measurement uncertainty at real exhaust gas conditions under a wide range of combustion and measuring conditions uncertainty and accuracy of the measurements with the reference method for determining the concentration of dust at small-scale furnaces is established.

Based on statistical methods to assess the accuracy and the development of suggestions to improve current standards and guidelines, a methodology has been developed which allows the validation of new dust measurement systems in the future. As part of an exemplary validation of a new dust measuring instrument a measurement uncertainty of 15% was determined for this system. A new state of the art with respect to the accuracy of measurements for limit value monitoring at small-scale furnaces could be established.

Additionally, it was demonstrated by experimental studies on the isokinetic sampling that effects of non-isokinetic sampling at smal-scale furnaces can be neglected. To increase the accuracy of the measurements for the future it is recommended to do without isokinetic sampling, but rather to increase the mass of collected dust, and to use a maximum possible sample volume.