



MATERIA LIEN

Vereinfachte Überwachung der Staubemissionen bei Holz-Kleinf Feuerungsanlagen (Delta - p - Methode)

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München
Internet: www.umweltministerium.bayern.de
E-Mail: poststelle@stmugv.bayern.de

- Januar 2005 -

© StMUGV, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing,
Sachgebiet "Technologie Nachwachsender Rohstoffe"

Autoren: Dr. Hans Hartmann
Volker Schmid
Heiner Link
Dipl.-Phys. Paul Roßmann
Thomas Decker
TFZ

Dr. Stephan Ester
Fa. Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg

Herbert Wazula
Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV)
und Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk (LIV-Bayern)

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMUGV erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMUGV, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMUGV oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMUGV Einsicht nehmen.

Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMUGV vertreten.



Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

Abschlussberichte

**Teil I: Senkung des Messaufwandes bei der Ermittlung der
Staubemissionen aus Holz-Kleinfeuerungsanlagen**
(Okt. 2001)

**Teil II: Feldstudie zur vereinfachten Feststellung von Staub-
Grenzwertüberschreitungen (Delta-p-Methode)**
(Dez. 2003)

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, und
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucher-
schutz, München

Autoren: Dr. Hans Hartmann
Volker Schmid (Dipl.-Ing. FH)
Heiner Link (Dipl.-Ing. FH)
Dipl.-Phys. Paul Roßmann
cand. agr. Thomas Decker
Technologie- und Förderzentrum - TFZ

Dr. Stephan Ester
Fa Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg

Herbert Wazula
*Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband
(ZIV) und Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk
(LIV-Bayern)*

Dipl.-Ing. Gerhard Schmoeckel
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg

Durchführung: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Sachgebiet "Technologie Nachwachsender Rohstoffe"
Schulgasse 18, D-94315 Straubing, Germany
Tel. 09421-300-210, Fax.: 09421-300-211
Internet: <http://www.tfz.bayern.de/>

Zusammenfassung - Einordnung der Ergebnisse aus Sicht des Auftraggebers

Die Entwicklungen bei der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Sinne einer Verminderung der klimaschädlichen CO₂-Emissionen werden vom Landesamt für Umweltschutz (LfU) auch unter dem Aspekt des Immissionsschutzes aufmerksam beobachtet. Das Heizen mit Holz wird dabei als unterstützenswerte Maßnahme angesehen, um CO₂ einzusparen, soweit die Verbrennung in emissionsarmen Feuerungsanlagen und in Gebieten mit nicht kritischer Luftqualität erfolgt.

Als Hemmnis für einen verstärkten Einsatz von Holz in Kleinfeuerungsanlagen werden von Betreibern und Anlagenherstellern vielfach die jährlich vom Kaminkehrer durchzuführenden Überwachungsmessungen und die damit verbundenen Kosten beklagt. Insbesondere bei Beanstandungen sind die dadurch erforderlichen Doppelmessungen kostenintensiv. Da die Quoten für Beanstandungen wegen Überschreitung des Staubgrenzwertes mit ca. 20 % der überprüften Anlagen relativ hoch liegen, kann aus immissionsschutzfachlicher Sicht jedoch auf eine regelmäßige Kontrolle nicht verzichtet werden.

Die Diskussion der Möglichkeiten zur Verminderung des Messaufwandes mit Anlagen- und Messgeräteherstellern ergaben, dass Staub-Grenzwertüberschreitungen häufig durch eine nicht stauboptimierte Einstellung der Feuerungsanlagen verursacht werden. Die hierfür erforderliche gravimetrische Auswertung der Filterhülsen ist vom Kundendienst nicht vor Ort leistbar, sodass die stauboptimierte Einstellung nur schwer möglich ist.

Neben neuartigen Messverfahren kommen aber auch - möglicherweise in Kombination - geeignete Prüfungen von Anlagen-, Betriebs- und Abgasparametern in Betracht, wenn sie eine zuverlässige Aussage über die Staubemissionen der Anlage erlauben.

Die hierzu nach der Diskussion vom TFZ vorgeschlagenen Projekte

- Senkung des Messaufwandes bei der Ermittlung der Staubemissionen aus Holz-Kleinfeuerungsanlagen (Projektteil 1)
- Feldstudie zur vereinfachten Feststellung von Staub-Grenzwertüberschreitungen (Delta-p-Methode) (Projektteil 2)

wurden mit Mitteln des Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) und mit fachlicher Begleitung des LfU durchgeführt.

Es wurde ein neuartiges Staubmessverfahren entwickelt, bei dem der Druckabfall an der Filterhülse mit zunehmender Verschmutzung während der Messung erfasst und vor Ort ausgewertet werden kann. Der Messablauf selbst bleibt dabei unverändert. Das Messverfahren wurde als erfolgversprechend angesehen, sodass es im Rahmen der Projekte getestet werden sollte.

In einem ersten Projektteil wurde das neue Messverfahren zunächst auf einem Feuerungsprüfstand im Abgas einer Hackschnitzelfeuerung auf seine grundsätzliche Eignung getestet. Dabei wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Brennstoffe und Betriebsvarianten untersucht.

Nach erfolgreichem Abschluss wurde im zweiten Projektteil in einer Feldstudie die Praxisauglichkeit des Verfahrens geprüft. Hierbei erfolgten in der Heizperiode 2002/2003 im Rahmen der üblichen Überwachung durch die Kaminkehrer Messungen an nahezu 400 Kleinfeuerungsanlagen in Bayern. Neben den Messungen wurden spezielle Daten zu den Anlagen und deren Betriebsweise erhoben, um Zusammenhänge mit den Staubemissionen herauszuarbeiten.

Von den an der Studie beteiligten Kaminkehrern wurde begrüßt, dass Fehlmessungen, z.B. durch Filterriss oder defekte Absaugleitung, vom Messgerät angezeigt und sofort erkannt werden können. Der Zusammenhang zwischen den Differenzdruck- und den Staubkonzentrationswerten war allerdings weniger deutlich als erwartet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass

- Brennstoffbeschaffenheit und Verbrennungsqualität Auswirkungen auf die Staubzusammensetzung haben,
- feinere Partikel bei der Belegung des Filters andere Eigenschaften auf die Gasdurchlässigkeit haben als gröbere Partikel,
- auch bei den gravimetrisch ermittelten Staubwerten mit einer nicht vernachlässigbaren Messunsicherheit gerechnet werden muss,
- während der Staubmessung Partikel in das gestopfte Filtermaterial tiefer eindringen und damit einen geringeren bzw. keinen Differenzdruckanstieg bewirken; die Eindringtiefe ist mit dem verfügbaren Filtermaterial bei unterschiedlichen Filtern nicht ausreichend reproduzierbar.

Ein wichtiger Schritt für die Anwendung des Messverfahrens bei der Anlagenüberwachung ist daher die Optimierung des Filters hinsichtlich homogener Materialeigenschaften. Bei der Einstellung der Anlage durch den Kundendienst im Sinne minimaler Staubemissionen kann das Messverfahren jedoch wertvolle Hilfestellung bereits leisten.

Wichtigste Ergebnisse der Auswertung der erhobenen Daten sind:

Ein Zusammenhang zwischen den CO- und den Staubemissionen ist zunächst nicht erkennbar. Beschränkt man die Auswertung auf die handbeschickten Anlagen, so zeigt sich für diese Anlagengruppe, dass offenbar nur bei CO-Konzentrationen von mehr als 1 g/Nm³ Überschreitungen des Staubgrenzwertes von 0,15 g/Nm³ auftreten.

Bei handbeschickten Anlagen sind sowohl für Staub als auch für CO die Beanstandungsquoten umso niedriger, je größer das spezifische Wärmespeichervolumen gewählt ist.

In der Diskussion der Anforderungen an die Überwachung von Holz-Kleinfeuerungsanlagen im Rahmen der Novellierung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) stellen die Ergebnisse sowie die erhobenen Daten eine wertvolle Grundlage dar.

Abschlussbericht I

Senkung des Messaufwandes bei der Ermittlung der Staubemissionen aus Holz-Kleinf Feuerungsanlagen

Dr. Hans Hartmann
Volker Schmid (Dipl.-Ing. FH)
Heiner Link (Dipl.-Ing. FH)

Technologie- und Förderzentrum - TFZ

Dr. Stephan Ester
Fa Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg

Herbert Wazula
Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV) und Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk (LIV-Bayern)

Dipl.-Ing. Gerhard Schmoeckel
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg

Oktober 2001

Danksagung

Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) finanziell gefördert und im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) durchgeführt. Für das uns entgegengebrachte Vertrauen möchten wir uns an dieser Stelle bedanken.

Neben der genannten finanziellen Förderung wurde das Projekt vom Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg auch fachlich begleitet; für diese Unterstützung möchten wir uns besonders bei Herrn Gerhard Schmoeckel bedanken.

Darüber hinaus wurde – neben der Bereitstellung des Prototypen durch die Firma Wöhler – das Projekt auch von weiteren Partnern unterstützt. Besonderer Dank gilt hier dem Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk in München, namentlich Herrn Herbert Wazula sowie Herrn Fritz Weber, die bei der Ausarbeitung des Messprogramms sowie bei der Beschaffung von Messmitteln und der Interpretation der Ergebnisse wertvolle Anregungen und Unterstützungsleistungen eingebracht haben.

Die für die Messung verwendete Feuerungsanlage wurde von der Firma Heizomat-Gerätebau GmbH bereitgestellt. Hierfür – und für die geleistete Hilfestellung beim Aufbau und bei der Inbetriebnahme durch Herrn Ernst Herrmann – möchten wir uns ebenfalls sehr herzlich bedanken.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

(Bericht I)

Seite:

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	2
3	Prinzipien und Unterschiede bei der Staubemissionsmessung	3
3.1	Staubmessung nach VDI 2066.....	3
3.2	Staubmessung nach 1. BImSchV (Kaminkehrermethode).....	4
3.2.1	Neuentwicklung: Prototyp für Differenzdruckmessung ("Delta-P").....	5
4	Methodisches Vorgehen	7
4.1	Versuchsaufbau und Messanordnung.....	7
4.1.1	Prüfstands Aufbau und Messanordnung.....	7
4.1.2	Vorversuche zur Kernstrombestimmung	9
4.2	Mess- und Analyseverfahren.....	10
4.2.1	Feuerungs- und Emissionsmessgrößen.....	10
4.2.2	Brennstoffparameter	13
4.3	Beschreibung der verwendeten Feuerungsanlage.....	14
4.4	Versuchsbrennstoffe.....	15
4.4.1	Herkunft, Beschaffung und Aufbereitung.....	16
4.4.2	Heizwert und Aschegehalt	19
4.5	Versuchsprogramm (Übersicht)	20
4.6	Versuchsdurchführung	22
4.6.1	Inbetriebnahme und Vorversuche	22
4.6.2	Durchführung der Verbrennungsversuche	22
4.7	Auswertung.....	24
4.7.1	Abgas (CO, VOC).....	24
4.7.2	Gesamtstaub	24
5	Ergebnisse und Diskussion	27
5.1	Korrelation der Differenzdruckmessung mit anderen Messgrößen.....	27
5.2	Identifikation eines Schwellenwertes S_p für den Differenzdruck (Delta-p)	30
5.3	Vergleich der Staub- und CO- und O ₂ -Messverfahren.....	34
5.4	Einfluss des Aschegehaltes	38
6	Zusammenfassung	40
7	Quellenverzeichnis	42

1 Einleitung

Die Anzahl der von den Kaminkehrern beanstandeten Hackschnitzelfeuerungen ist relativ hoch. Nach Angaben des Landesinnungsverbandes des bayerischen Kaminkehrerhandwerks müssen bei 32 % der wiederkehrend gemessenen Anlagen Nachprüfungen erfolgen. Als Beanstandungsursache überwiegen hierbei die überhöhten Staubemissionen. Anders als beim Kohlenmonoxid ist das Ergebnis der Überprüfung jedoch nicht unmittelbar vor Ort feststellbar, sondern erst nach dem Auswiegen einer für die Messung verwendeten Filterhülse. Unter Umständen vergehen somit mehrere Wochen, bis der Betreiber von der Beanstandung erfährt und die Ursachen beseitigen kann. Durch das gravimetrische Verfahren ist die Messung zudem relativ kostspielig. Zur Zeit wird kein praxisnahes Messverfahren angeboten, welches eine abschließende Staubauswertung bereits vor Ort ermöglicht. Das ist auch der Grund, warum die Staubmessung beim Service durch den Kundendienst fast gänzlich vernachlässigt wird. Somit besteht auch nicht die Möglichkeit, eventuelle Grenzwertüberschreitungen bereits vor der eigentlichen Kaminkehrermessung angezeigt zu bekommen.

Neuartige Messmethoden könnten hier Abhilfe schaffen und zu einer Beschleunigung und Verbilligung der Überprüfung führen. Technische Lösungsansätze wurden hierzu von der Firma Wöhler in Form einer Differenzdruckmessung entwickelt ("Delta-p-Methode"). Bei diesem Verfahren wird der mit zunehmender Filterverschmutzung beobachtete Anstieg des Differenzdrucks über dem Filter einer Staubmesssonde gemessen, wobei der abgesaugte Gasdurchsatz gerätebedingt konstant bleibt. Die in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 15 Minuten) gemessene Druckdifferenz kann auf eine mögliche Überschreitung der Emissionsbegrenzung für Staub hinweisen.

2 Zielsetzung

Im Vordergrund der Betrachtungen steht die Beurteilung des Differenzdruckverfahrens als mögliche Sofortbestimmungsmethode für Staubgrenzwertüberschreitungen im Abgas von Holzfeuerungen kleinerer Leistung. Hauptaufgabe dieser Untersuchung ist es daher, eine Empfehlung für einen geeigneten Schwellenwert S_p als Kriterium für den maximal zulässigen Differenzdruck an der Filterhülse zu geben. Wird dieser Schwellenwert S_p im Laufe der 15-minütigen Probenahme erreicht bzw. überschritten, so muss die Filterhülse nach wie vor gravimetrisch ausgewertet werden. Bleibt jedoch sowohl die Druckdifferenz bis zum Ende der Messung unterhalb dieses Schwellenwertes S_p und wird außerdem der CO-Grenzwert eingehalten, so hält die Feuerungsanlage auch ohne langwierige gravimetrische Analyse die Emissionsgrenzwerte ein.

Im Rahmen des hierfür vorzusehenden Versuchsprogramms sollen noch weitere vergleichende Untersuchungen zwischen den Messverfahren für Staub und Kohlenmonoxid (CO) angestellt werden, um so eine weitergehende Analyse der verfahrensbedingten Einflüsse auf die Messergebnisse für Staub und bei CO zu ermöglichen. Im Einzelnen lassen sich die Ziele der Arbeiten wie folgt auflisten:

- Schaffung einer ersten Datenbasis zur Beurteilung des Zusammenhangs von Staubmesswerten, die einerseits mit der herkömmlichen Kaminkehrer-Messmethode und andererseits nach der Delta-p-Methode zustande kommen.
- Erste Erkenntnisse über die Festlegung eines möglichen Schwellenwertes für den Differenzdruck (S_p) als Indikator für Staubgrenzwertüberschreitungen.
- Feststellung möglicher Abhängigkeiten des Differenzdrucks von Kohlenwasserstoffemissionen als Indikator für vermehrte Feinstaubanteile im Abgas (bei gravimetrischer Messmethode kann der Staub-Grenzwert auch durch die weniger problematische Grobstaubfraktion überschritten werden).
- Ableitung von Empfehlungen für ein ggf. weiteres Vorgehen.
- Vergleich der CO- und Staubmessmethoden des Kaminkehrerhandwerks mit den Prüfstandsmethoden nach EN-303-5 bzw. VDI-2066.
- Erkenntnisse über die Auswirkung des Brennstoffaschegehalts auf den Staubausstoß.

Nicht beabsichtigt ist es, im Rahmen des vorgestellten Forschungsvorhabens eine Methode zu entwickeln, nach der die Druckdifferenz an der Filterhülse in eine Massenbelastung (mg/Nm^3) des Filters umgerechnet werden kann. Die Druckdifferenz ist vielmehr eine zweite, unabhängige Größe, um "staubsaubere" Anlagen frühzeitig zu erkennen. Für den offiziellen Nachweis der Unterschreitung von Staubgrenzwerten müsste die Verwendung dieser neuen Methode zukünftig über eine Neufassung der 1.BImSchV geregelt werden.

3 Prinzipien und Unterschiede bei der Staubemissionsmessung

3.1 Staubmessung nach VDI 2066

Messprinzip. Der Hauptmassenstrom des Staubes in einem Gas kann nicht unmittelbar gemessen werden. Zu seiner Bestimmung ist eine Teilstromentnahme erforderlich. Die Teilstromentnahme soll geschwindigkeitsgleich (isokinetisch) erfolgen, da sonst eine Entmischung des Gas/Staub-Stromes möglich wäre. Aufgrund der Massenträgheit der Staubpartikel würden bei hiervon abweichenden Absaugbedingungen entweder höhere Fein- oder Grobanteile der Staubfraktion bestimmt. Die gemessene Staubbelastung ergibt sich als Mittelwert aus der abgeschiedenen Staubmasse und dem durchgesaugten Teilvolumen über die Messzeit, die mit Rücksicht auf die Massenbestimmung nicht beliebig klein sein kann.

Die kürzest mögliche Probenahmedauer richtet sich nach dem vorgesehenen Teilvolumenstrom, der zu bestimmenden Staubbelastung und der Nachweisgrenze der Massenbestimmung. Ferner ist die Beprobungsdauer von weiteren Randbedingungen der Aufgabenstellung abhängig und entsprechend anzupassen.

Darüber hinaus weist die Staubverteilung fast immer örtliche Unterschiede in der Strömungsquerschnittfläche (Messebene) auf. Eine lückenlose Erfassung des Staubmassenstromes im Messquerschnitt ist bei Teilstromentnahme unter vertretbarem Aufwand nicht möglich. Die durch die stichprobenartige Erfassung des Teilmassenstromes bedingten Messunsicherheiten lassen sich unter praktischen Bedingungen in den meisten Fällen nicht exakt angeben.

Gasabsaugung und -aufbereitung. Ausgehend von der Forderung einer geschwindigkeitsgleichen (isokinetischen) Absaugung ergibt sich der erforderliche Sondendurchmesser aus der höchsten Gasgeschwindigkeit im Messquerschnitt und dem vorgesehenen Teilvolumenstrom in der Entnahmesonde.

Der abgesaugte Teilgasstrom gelangt durch eine Schlauchleitung in einen Kondensatabscheider, in dem der größte Teil der im Gas enthaltenen Feuchtigkeit kondensiert. Zur vollständigen Trocknung des Gases durchströmt es einen mit Silicagel gefüllten Trockenturm. Zur Volumenstrommessung durchströmt das trockene Gas eine Gasuhr, an welcher Volumen, Druck und Temperatur abgelesen werden. Mit einer Absaugpumpe wird der erforderliche Teilgasstrom eingestellt.

Entnahmeort. Der Entnahmeort ist gemäß den Regeln der Technik für Staubmessungen für die jeweilige Aufgabenstellung auszuwählen. Die nach VDI 2066 verwendeten Geräte werden in der Regel bei Messungen an "Großanlagen" eingesetzt. Daher sollten dort die Entnahmestellen idealerweise nach strömungstechnischen Gesichtspunkten angeordnet und ausgeführt sein. Wo diese Anforderungen nicht erfüllt werden können, sind für die

Zeit der Messung auch Einbauten in die Rohrleitungen empfehlenswert, um in der entsprechenden Messebene die Strömungsbedingungen zu optimieren.

Heizbare Sonde. Um eine Kondensation der Abgasfeuchtigkeit zu vermeiden, muss die Einheit der Filterhalterung mit der Sonde auf die Abgastemperatur vorgewärmt werden; in jedem Fall darf die Temperatur nicht unter die Abgastaupunkttemperatur sinken.

3.2 Staubmessung nach 1. BImSchV (Kaminkehrermethode)

Messprinzip. Auch bei der Kaminkehrermessung wird – wie bei der VDI-Methode – ein Teilstrom des Abgases entnommen und die Staubbiladung gravimetrisch bestimmt. Die Probenahmeparameter können mit diesem Gerät aber nicht – wie bei der Messung mit einem Gerät nach VDI 2066 – variiert werden. Es stellt vielmehr ein für den Praxiseinsatz optimiertes Gerät dar und deckt somit die Bandbreite der für die Überwachungsaufgabe üblichen Messfälle ab. Allgemein wird, wie oben beschrieben, bei Staubmessungen isokinetisch abgesaugt. Da eine genaue Geschwindigkeitsmessung im Rauchgas einen hohen messtechnischen Aufwand erfordert, wird die Messung nach BImSchV unter vereinfachenden Bedingungen unter Annahme eines "konstanten üblichen Wertes" durchgeführt. In einer vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Eignungsprüfung werden Abweichungen von weniger als 5 % nachgewiesen.

Bei einem Kaminkehrergerät werden 135 Normliter (NL) Rauchgas in 15 Minuten durch eine Glasfaserhülse gesaugt. Die mikroprozessorgesteuerte Rauchgasentnahme basiert auf einer Massenstrommessung, die unabhängig vom Strömungswiderstand (z. B. zunehmende Filterbeladung) von der Messgastemperatur und vom Luftdruck einen Volumenstrom von 9 NL/min gewährleistet. Die Absauggeschwindigkeit an der Sondenöffnung beträgt hierbei 4 m/s bezogen auf eine Rauchgastemperatur von 325 °C und einem Druck von 1 013 hPa. Bei hiervon abweichenden Temperaturen und Drücken ändert sich daher zwar die Absauggeschwindigkeit, das Volumen von 135 NL bleibt jedoch konstant.

Parallel zur Staubmessung wird innerhalb von 15 Minuten ein Abgassammelbeutel gefüllt. Anschließend erfolgt die O₂- und CO-Analyse der im gefüllten Rauchgassammelbeutel gewonnenen Gasprobe. Hierzu wird eine zugelassene integrierte Rauchgasanalyseeinheit mit elektrochemischen Messzellen verwendet.

Die Konditionierung, Wägung und Kennzeichnung der unbeladenen Filterhülsen erfolgt normalerweise durch ein zentrales Labor (hier: Zentralinnungsverband des Deutschen Schornsteinfegerhandwerks in St. Augustin). Dieses Labor übernimmt auch die Rückwaage der beladenen Staubhülse und teilt dem Einsender das Messergebnis mit. Für Forschungszwecke kann – wie im vorliegenden Vorhaben – diese Prozedur auch im Labor der jeweiligen Prüf stelle (d.h. hier: an der Landtechnik Weihenstephan) erfolgen.

Entnahmeort. Der Entnahmeort für das Rauchgas ist in einer Entfernung von 2D ("2 x D", wobei D = Abgasrohrdurchmesser) hinter dem Austritt aus dem letzten Wärmetauscher festgelegt. Die Entnahmesondenmündung muss an dieser Stelle im Kernstrom (d. h. im Temperaturmaximum) positioniert werden. Die Kernstromsuche und Messung der Kernstromtemperatur erfolgt mit einer Temperatursonde, die im Rohrrinneren verschoben wird, bis die Position mit der höchsten Temperatur gefunden wurde. Sollte der nach dieser Forderung ermittelte geometrische Entnahmeort aufgrund ungeeigneter

Strömungsführung nicht geeignet sein (z. B. Krümmungen, Ablagerungen, Wirbel), so sollen die nachfolgend erläuterten, allgemein für "Staubmessungen gültigen Regeln der Technik" beachtet werden.

Regeln der Technik für Staubmessungen. Die Entnahmestelle sollte vorzugsweise in einer vertikalen Rohrstrecke mit ungestörten Strömungsverhältnissen liegen. Unter praktischen Bedingungen soll der Abstand der Entnahmestelle von der nächsten "Störstelle" (Umleitung, Einschnürung) stromaufwärts mindestens 5D, und stromabwärts mindestens 2D, besser 5D betragen. Um Wandeinflüsse auszuschalten, wird in der geometrischen Mitte des Abgaskanals gemessen, da hier auch der Kern des Rauchgasstromes zu finden ist.

Ist es nicht möglich, im Vertikalen zu messen, so muss in jedem Fall grundsätzlich im Kernstrom gemessen werden. Allerdings führen nicht-vertikale Entnahmestellen zu weiteren Störeinflüssen auf die Staubverteilung über den Querschnitt, die sich immer ungünstig auf die Staubprobenahme auswirken. Diese sind unter Praxisbedingungen in der Regel nicht quantifizierbar.

Gasabsaugung und -aufbereitung. Gemäß den oben erläuterten Auslegungsbedingungen des Messverfahrens wird mit einem für alle Betriebsbedingungen gleichbleibenden Sondenquerschnitt ($d = 9,74$ mm) abgesaugt. Die Kondensation des Rauchgases erfolgt in einem aktiv gekühlten Kondensatabscheider, einer Nachrocknungskammer und einer weiteren Kammer mit Filterwatte. Danach folgt der Massenstromsensor, ein Pulsationsdämpfer und eine geregelte Drehschiebersaugpumpe. Der Massenstromsensor liefert die Ist-Größe zur automatischen Regelung der Drehschiebersaugpumpe.

Heizbare Sonde. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen mit verschiedenen Messgeräten zu ermöglichen, wird der abzuschneidende Staub auf eine einheitliche Abscheidetemperatur am Filter bezogen. Durch eine geregelte Heizung wird die Filtertemperatur in der Filterhalterung auf 70 °C eingestellt. Zu hohe Eintrittstemperaturen infolge hoher Rauchgastemperaturen müssen für die Dauer der Messung mit den Sondenrohrkühlern, die auf das Gerät abgestimmt wurden, abgesenkt werden. Abgasbestandteile, die oberhalb der Filtertemperatur kondensieren, werden im Filter abgeschieden. Die übrigen Kondensate schlagen sich in der nachfolgenden Filtereinheit nieder.

3.2.1 Neuentwicklung: Prototyp für Differenzdruckmessung ("Delta-P")

Die Delta-P-Staubmesssonde DPS2000 stellt eine funktionale Erweiterung der beheizten Sonde für die eignungsgeprüften Staubmessgeräte SM78, SM96 und SM96-CO dar (siehe Abb. 1). Neben der Aufnahmelhalterung einer Glasfaser-Filterhülse besitzt die Sonde des DPS2000 zusätzlich eine Druckmeseinrichtung, die den Differenzdruck an der Filterhülse während der Probenahme erfasst. Der konstante Abgasteilmassenstrom von 9 NL/min wird dabei vom Staubmessgerät überwacht und geregelt.

Das Anzeigegerät dient sowohl zur Spannungsversorgung des Drucksensors an der Filterhalterung als auch zur Aufbereitung und Speicherung von insgesamt 90 Differenzdruckwerten, die in 10 Sekunden-Intervallen ermittelt werden (ausreichend für eine Messdauer von insgesamt 15 min). Das Anzeigegerät erkennt den Start der Staubmessung automatisch am Überschreiten eines Schwellenwertes, der angepasst werden

kann. Diese Schwellenwertvoreinstellung beträgt 10 hPa. Der Verlauf der 90 Messwerte wird am Display angezeigt und ermöglicht eine Kontrolle der Beladung der Hülse. Die vom Anzeigegerät zum PC übertragenen Messwerte werden anschließend in einer Datei abgespeichert und stehen zur weiteren Auswertung bereit.

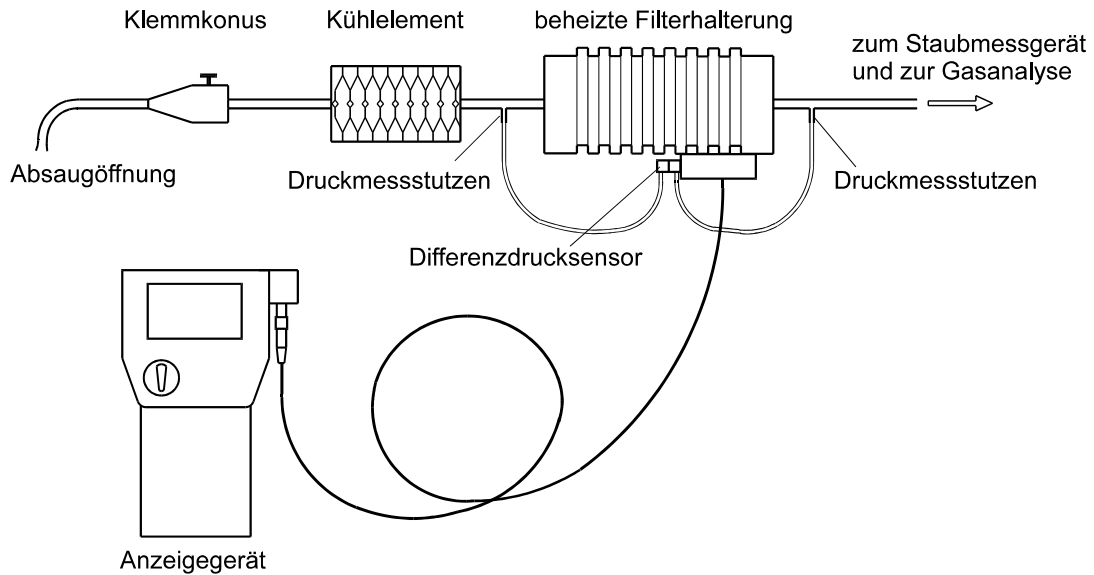


Abb. 1 Messgerät DPS-2000 für die Bestimmung des Differenzdrucks bei der Staubmessung (Prototyp einer technischen Erweiterung an einem konventionellen Messgerät für Staubmessungen nach 1.BImSchV, Hersteller: Fa. Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg) (nach /6/)

4 Methodisches Vorgehen

4.1 Versuchsaufbau und Messanordnung

4.1.1 Prüfstandsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik durchgeführt. Die messtechnische Ausstattung wurde für dieses Vorhaben mit den Projektpartnern abgestimmt. Den groben Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung (am Standort in Weißenstephan) zeigt Abb. 2.

Abgasmessstrecke. Der Gesamtstaubgehalt wurde mit allen drei Probenahmegeräten zeitgleich erfasst; hierzu bestand der Versuchsaufbau abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit einem Krümmer zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage.

Die Messstellen für die Filterkopfgeräte wurden beide in derselben Ebene in einem Abstand von ca. $4 \times D$ nach dem Rohrbogen angeordnet (in Anlehnung an VDI 2066, Blatt 1 /11/). Die Messstellen für das Kaminkehrermessgerät wurden in einem Abstand von ca.

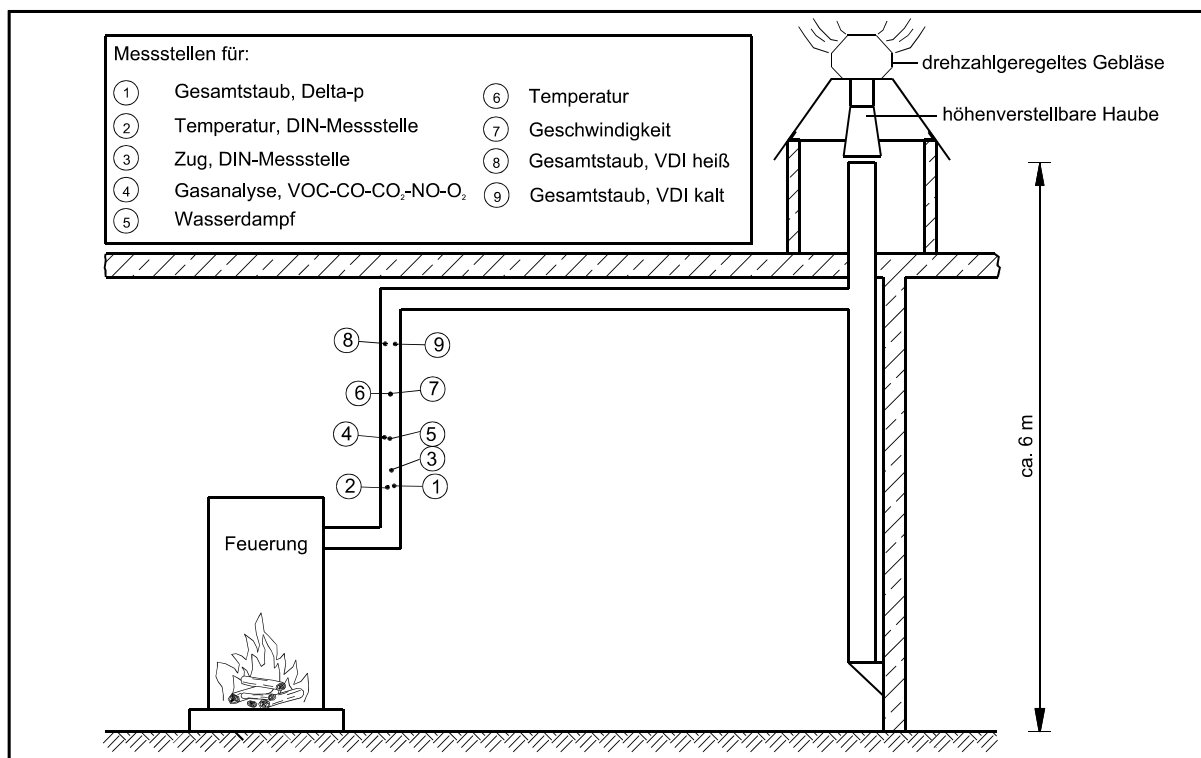


Abb. 2 Grobschematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung

2 x D nach dem Rohrbogen gemäß der praxisüblichen Vorgaben angeordnet. Im vertikalen Rohr waren die "DIN-Messstellen" für die Abgastemperatur und für den Kaminzug untergebracht. Sie waren in ihrer Lage und Position nach DIN 4702 Teil 2 /1/ angeordnet; eine entsprechende Darstellung gibt Abb. 3.

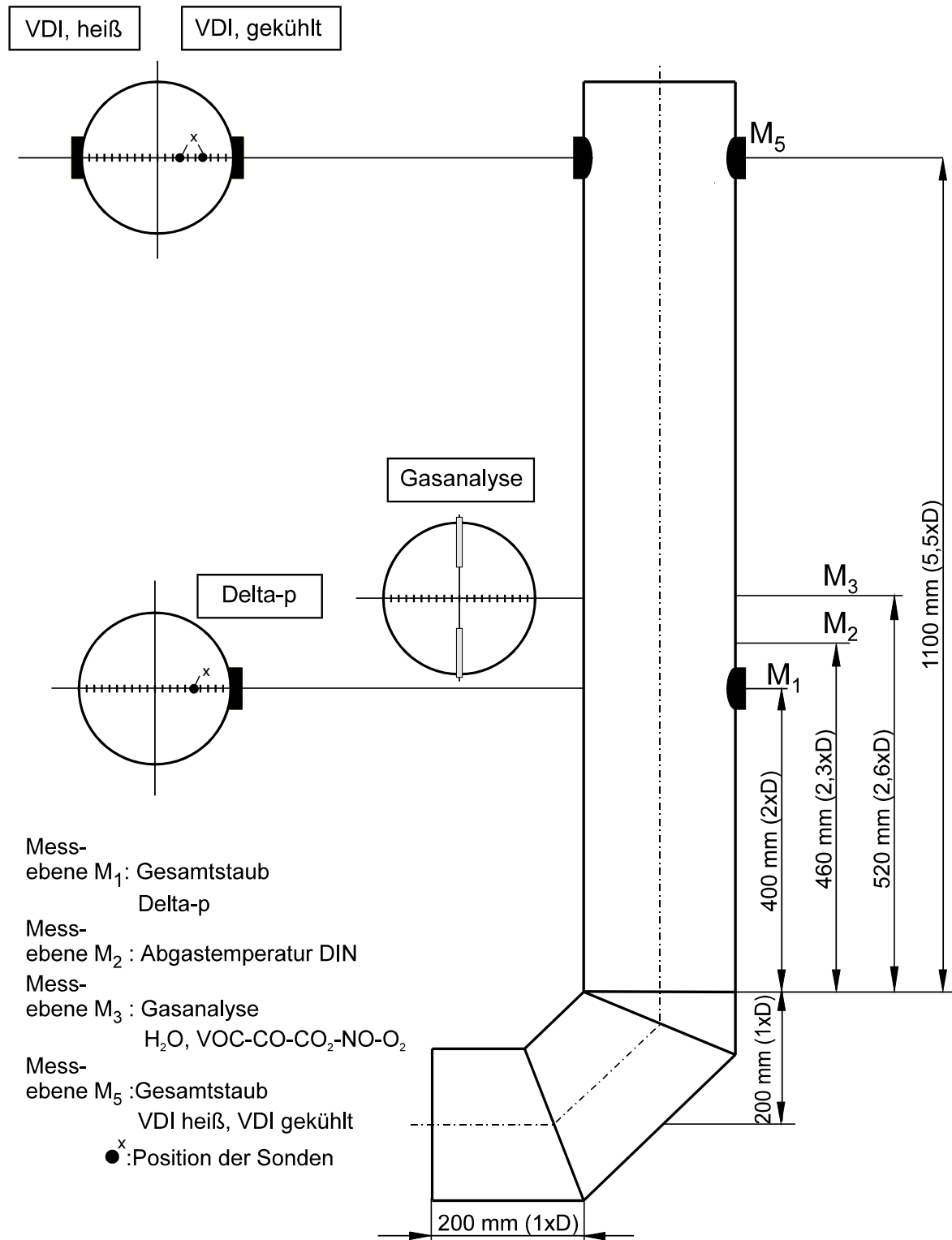


Abb. 3 Anordnung und Lage der Staub- und Temperaturmessstellen der Messstrecke

Nach seinem Durchtritt durch die Messstrecke wird das Abgas über eine flexible Verbindungsleitung in einen Edelstahlkamin geleitet und über diesen an die Außenluft abgeführt.

Wärmeleistungsmessstrecke. Die Feuerungsanlage wurde wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf angeschlossen. Dieser ermöglichte die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme. Die hydraulische Messstrecke entspricht den Anforderungen der DIN 4702 Teil 2 /1/ (vgl. "Kreislauf mit Kurzschlussstrecke"). Sie wird ebenso wie der gesamte Kühlkreislauf bei LAUNHARDT et al. /10/ ausführlich beschrieben.

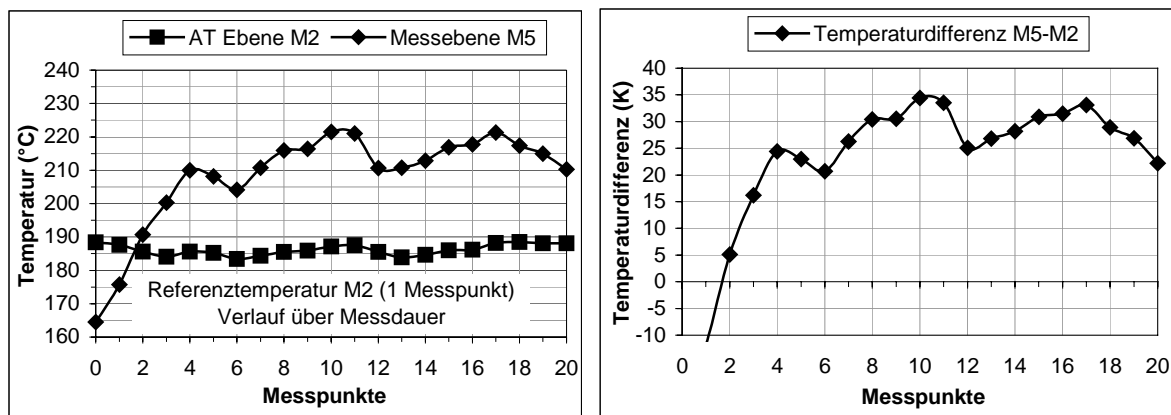
4.1.2 Vorversuche zur Kernstrombestimmung

Für die Probenahme im Abgas, insbesondere bei der Staubprobenahme, ist die Kenntnis des tatsächlichen Strömungsprofils erforderlich, um bei etwaigen Profilstörungen zusätzliche Fehler durch eine ungeeignete Positionierung der Probenahmesonde vermeiden zu können. Da eine messtechnische Erfassung des Strömungsprofils im Rauchgas jedoch sehr arbeits- und zeitaufwendig ist, wird bei der Probenahme vor Ort das sogenannte Kernstromverfahren angewendet. Bei diesem Verfahren wird angenommen, dass sich im Abgasrohr entsprechend der vorgefundenen Abgasführung eine Strömung ausbildet, in deren Zentrum der Abgasstrom gleichmäßiger ist als in den Randbereichen. Da dieser Kernbereich nicht immer in der geometrischen Mitte der Messebene liegt, muss der Kernstrom vor jeder Messung bestimmt werden. Hierzu eignet sich eine Temperaturmessung, bei der die Messebene abgefahren wird und das Temperaturmaximum ermittelt wird. Der Ort des Temperaturmaximums kennzeichnet dann die momentane Lage des Kernstromes, in dem die Probenahmesonde ausgerichtet wird (siehe Abb. 3 und Abb. 4).

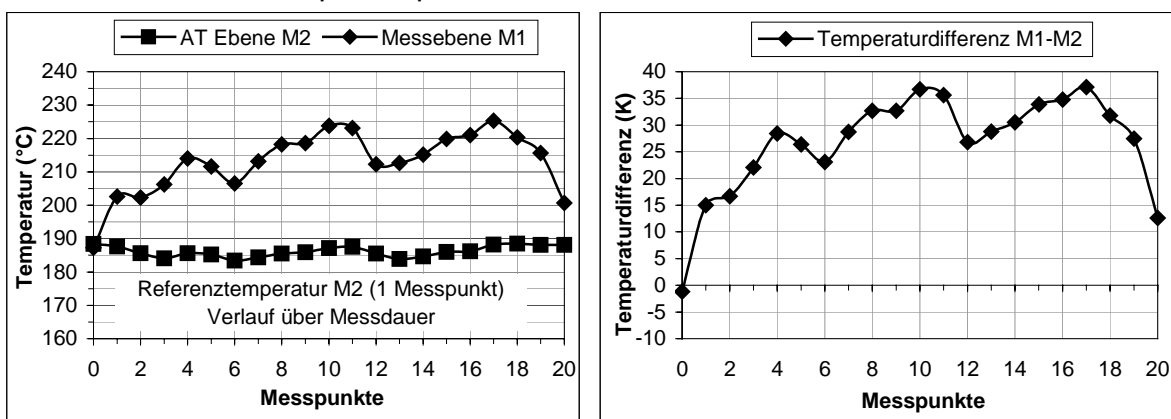
Um mehrere Messreihen aufnehmen zu können, wurde eine Vorrichtung aufgebaut, die sich an der praxisüblichen Durchführung orientiert. Mit diesem Messaufbau konnte je eine Messachse mit einem Thermoelement gleichzeitig auf zwei Ebenen abgefahren werden. Die einzelnen Messpunkte einer Messachse wurden hierbei in auf- und absteigender Folge aufgenommen. Die Verweildauer an den Messpunkten orientierte sich an den Ansprechzeiten (t_{90}) der Temperaturfühler, sie lag unter den vorliegenden Bedingungen bei etwa 30 s. Die Aufnahme einer Achse mit 20 Messpunkten dauerte daher maximal 10 Minuten. Durch die lange Messdauer pro Punkt und Achse ergibt sich verfahrensbedingt jedoch keine scharfe örtliche Auflösung des Profils, da die Abgastemperatur anlagenbedingten Schwankungen unterworfen ist. Eine gleichzeitige Temperaturmessung und Erfassung an sämtlichen Messpunkten einer Achse hätte einen zu hohen apparativen Aufwand bedeutet.

Von den in den Vorversuchen mehrfach wiederholten Temperaturprofilmessungen wurden zwei Profile ausgewählt, nach denen die endgültige Sondenposition festgelegt wurde. Diese Profile zeigt Abb. 4.

Temperaturprofil 1: obere Messebene M5 bei 5,5xD



Temperaturprofil 2: untere Messebene M1 bei 2xD

**Abb. 4** Temperaturprofile auf zwei Messebenen mit Messung in Längsrichtung

Die Temperaturprofile weisen in der zweiten Hälfte der Messachse (Messpunkte 10 bis 20) auf beiden Messebenen ein Temperaturmaximum auf. Auf Messebene M5 wurden die Sonden im Messpunkt 12, die andere im Messpunkt 16 ausgerichtet. Dadurch konnte zwischen den Sonden noch ein Abstand von einem Sondendurchmesser eingehalten werden, um einer Beeinflussung der beiden Teilgasströme entgegenzuwirken. Abb. 3 zeigt hierzu die Lage und Anordnung der Messebenen.

4.2 Mess- und Analyseverfahren

4.2.1 Feuerungs- und Emissionsmessgrößen

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Feuerungs- und Emissionsmessgrößen erfasst:

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Organische Stoffe (VOC)
- Gesamtstaub mit zwei Filterkopfgeräten nach VDI 2066, (sowohl mit vorgeschalteter Abgaskühlung (70 °C) als auch ohne Abgaskühlung)
- Gesamtstaub mit Kaminkehrermessgerät einschließlich Differenzdruckmessung ("Delta-p")

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Kohlenstoffdioxidgehalt im Abgas (CO_2)
- Abgastemperaturen
- Kaminzug

Zusätzlich wurden weitere Messgrößen wie Wasserdampfgehalt und Sauerstoffgehalt zur Umrechnung von Messgrößen erfasst. Die Anordnung der jeweiligen Messgeräte im Abgasstrom zeigt Abb. 5. Einige Messgrößen wurden kontinuierlich erfasst, andere nur diskontinuierlich.

Kontinuierlich erfasste Messgrößen. Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzte Messgerätetechnik sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind in den zugehörigen DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert.

Alle Messdaten wurden als Analogsignale von zwei Dataloggern (FLUKE HYDRA 2620A) erfasst und von einem PC zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung über zwei serielle Schnittstellen (RS 232) aufgenommen. Als Messdatenerfassungssoftware wurde das an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelte Programm PSM 9.3 verwendet. Die Abtastdauer für 38 Dataloggerkanäle betrug ca. 9 s. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wurden 60 s gewählt. Die Gasgeschwindigkeit wurde für jedes Intervall aus den Minutenmittelwerten der Messgrößen dynamischer Druck, Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur berechnet.

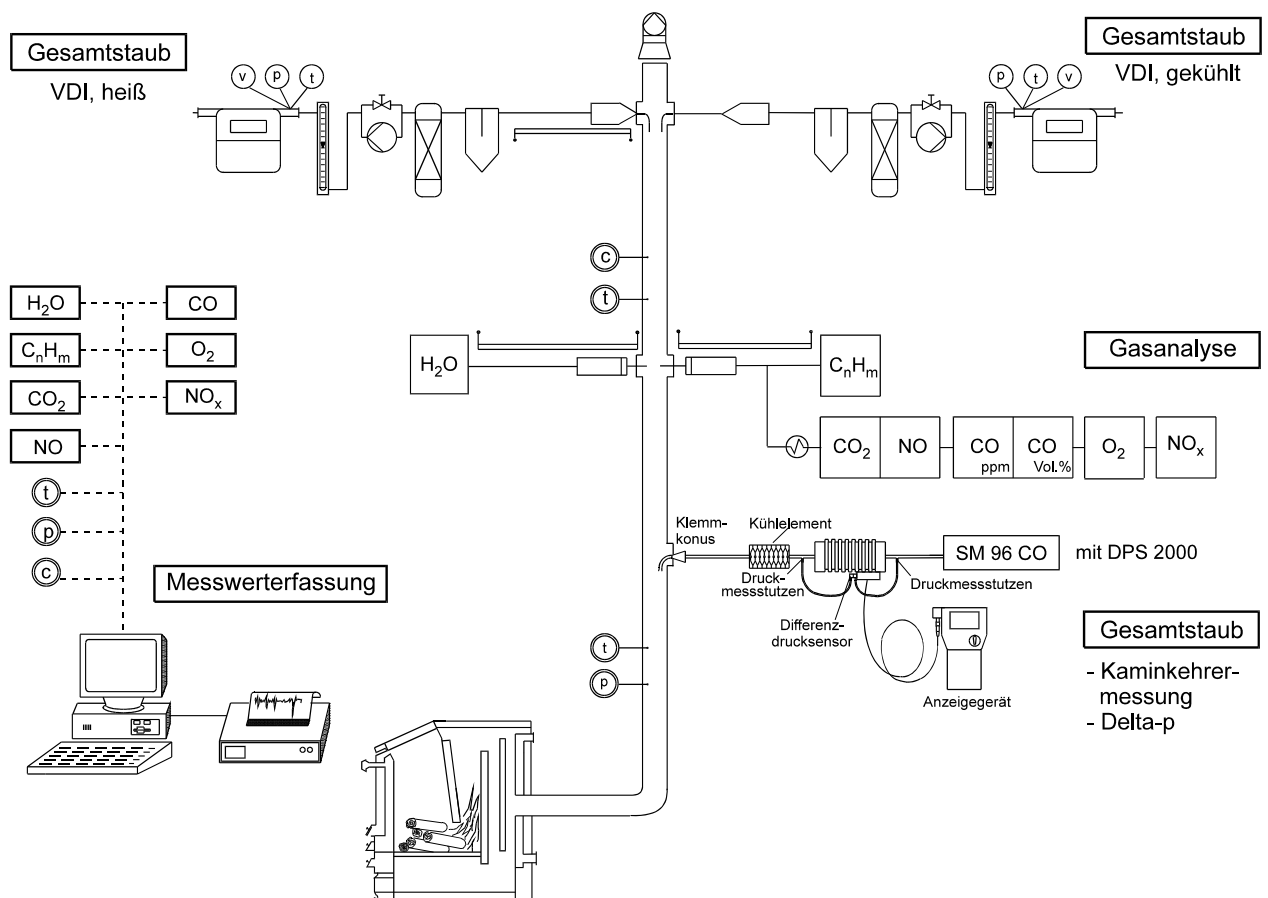


Abb. 5 Schematische Darstellung des Messgeräteaufbaus auf dem Prüfstand der Landtechnik Weihenstephan

Diskontinuierlich erfasste Messgrößen. Die Bestimmung der Staubemissionen als Gesamtstaub erfolgte diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme und anschließender Laboranalyse. Die hierfür eingesetzten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren, die in DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert sind. Vom Projektpartner, der Firma Wöhler, wurde für die Dauer der Versuchsreihen ein Staubmessgerät zur Verfügung gestellt, welches um eine Vorrichtung zur Erfassung des Druckverlustes an der Filterhülse ergänzt wurde. Die mit diesem Gerät beprobten Originalhülsen wurden vom Bundesverband des Schornstiefegerhandwerks (Zentralin-nungsverband, ZIV) bezogen und nach den Messungen auch dorthin zur Rückwaage zurückgeschickt.

Tabelle 1 Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskon- zentration ¹⁾
Temperatur	Thermoelement (Typ K), Fa. Philips-Thermocoax	Thermoelektrizität	0-1000 °C	---
statischer Druck	Präzisions-Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
dynamischer Druck	Staurohr mit Präzisions- Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
Luftdruck ³⁾	Barograph, Fa. Lambrecht	Aneroiddose	900-1000 hPa	---
<i>Abgasbestandteile</i>				
O ₂	OXYNOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0-21 %	20,9 % Luft-O ₂
CO ₂	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 %	17 % in N ₂
H ₂ O	Hygrophil 4220 B, Fa. Ultrakust	Psychrometrie	10-500 g/kg	---
CO	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-100 0-500 0-2500 0-5000 ppm ⁴⁾	450 bzw. 3950 ppm in N ₂
CO	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-3 %	2,3 % in N ₂
VOC ⁶⁾	Modell VE 7, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10 0-100 0-1000 ppm ⁵⁾	90 ppm C ₃ H ₈ in N ₂

Hinweise: Bestimmung von VOC und H₂O im feuchten Abgas bei vorgeschaltetem beheiztem Keramikfilter (Betriebs-temperatur: 180 °C, Porengröße: ca. 0,9 µm) und beheizter Messgasleitung (Betriebstemperatur: 180 °C, Länge 5 m); Bestimmung von O₂, CO₂, CO im trockenen Abgas nach Messgaskühler (Gasausgangstaupunkt: 5 °C) und Partikelfein-
filter (Porengröße: 0,9 µm und 0,2 µm)

¹⁾ relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)

³⁾ Ablesung einmal am Tag

⁴⁾ automatische Messbereichsumschaltung

⁵⁾ manuelle Messbereichsumschaltung

⁶⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas (η = 180 °C) gemäß VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1 /13/

Staub (Partikelmasse). Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte nach dem in den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 /11/ und Blatt 3 /12/ beschriebenen Messverfahren (Methode mit "Filterkopfggerät"). Bei dieser Probenahme wird ein staubbeladener Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wurde ein Quarzfaserfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP(0,3µm)) in einer Filterhülse im Rückhaltesystem eingesetzt, der aufgrund des geringen Durchmessers der Abgasmessstrecke ($D = 200 \text{ mm}$) außerhalb des Abgaskanals angeordnet war. Um eine Unterschreitung des Abgastaupunktes bei Beginn der ersten Probenahme zu vermeiden, wurden beide Geräte vor Versuchsbeginn im Wärmeschrank auf 100°C temperiert.

Eines der beiden Geräte wurde mit einem Abgaskühler betrieben. Hierbei wurde der Teilgasstrom vor Eintritt in das Rückhaltesystem durch einen Glaskühler geführt, der auf ca. 70°C temperiert wurde. Damit konnte eine Abscheidetemperatur an der Filterhülse im Bereich von $70\text{-}80^\circ\text{C}$ erzielt werden. Dieser Temperaturbereich entspricht in etwa den Temperaturbedingungen des Kaminkehrergeräts. Das zweite Gerät wurde ungekühlt betrieben, wobei sich eine Abscheidetemperatur entsprechend der Abgastemperatur über mindestens 120°C einstellte.

Nach der Filterhülse gelangt das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Eine optische Durchflussanzeige dient zusätzlich der Kontrolle zwischen dem einzustellenden Soll- und Istwert.

Die Dauer der Gesamtstaubprobenahmen erfolgte zeitgleich über einen Zeitraum von 15 Minuten. Bei jedem Brennstoff wurden für jedes Probenahmegerät drei Staubfilterhülsen beprobt. Die Beladung der Hülsen lag dabei zwischen ca. 1 und maximal 1025 mg. Der Probengasdurchsatz lag in einem Bereich von 1 bis $1,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Die Bestimmung der Staubmasse erfolgte gravimetrisch mit einer elektronischen Präzisionswaage (Fa. Mettler, Auflösung: 0,1 mg) durch Einwiegen der unbeladenen und Rückwiegen der beladenen Messfilter gemäß VDI-Richtlinie 2066 Teil 1 /11/. Die Wägung sowie die Konditionierung der Filter wurde im Labor der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt.

4.2.2 Brennstoffparameter

Als wichtigster Brennstoffparameter wurde der Wassergehalt bestimmt. Ergebnisse hierzu sind im Kapitel 4.4 (Tabelle 3) aufgeführt. Die Bestimmung erfolgte nach DIN 51 718 /3/ im Trockenschrank bei 105°C . Je Probe wurde eine Zweifachbestimmung mit jeweils 200 bis 800 g Einwaage (frisch) durchgeführt.

Als wesentliche brennstoffbedingte Einflussgröße für die Staubemission wurde außerdem der Aschegehalt im Brennstoff bestimmt. Diese Bestimmung erfolgte nach DIN 51 719 /4/. Auch hier wurde je Probe eine Zweifachbestimmung durchgeführt.

Für einige der verwendeten Brennstoffe erfolgte auch eine Heizwertbestimmung nach DIN 51 900 Teil 3 /5/.

Zur Ermittlung der Elementgehalte C, O, H, N, S, die für die Auswertungen und Emissionsberechnungen erforderlich sind, wurde weitgehend auf Werte aus der NAWARO-

Datenbank der Landtechnik Weihenstephan zurückgegriffen /9/, da diese Daten eine hinreichende Genauigkeit für die durchgeführten Messungen boten.

4.3 Beschreibung der verwendeten Feuerungsanlage

Als Feuerungsanlage wurde eine automatisch beschickte Hackschnitzelfeuerung vom Typ HSK-RA 50 (Abb. 6) von der Firma Heizomat zur Verfügung gestellt. Sie war bereits in einem früheren Forschungsvorhaben an der Landtechnik Weihenstephan eingesetzt worden (vgl. /8/) und daher in ihrem Betriebsverhalten bekannt.

Die Feuerungsanlage bietet ein Wärmeleistungsspektrum bis 50 kW und ist für den Einsatz von Holzspänen und Holzhackschnitzeln bis zu einer maximalen Größe von 50 mm geeignet. Durch eine automatische Rostreinigung sowie einer automatische Vorrichtung zur Entaschung und zur Abreinigung der Wärmetauscher wird ein ununterbrochener Betrieb bei gleichmäßig günstigen Betriebs- und Reinigungszuständen erreicht. Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr und die Brennstoffmenge werden in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt. Die Kesselleistung wird hierbei über diskrete, d. h. fest abgegrenzte Leistungsstufen geregelt; dabei wird in Abhängigkeit von der Kesselwassertemperatur zwischen Gluterhaltungs-, Teillast- und Nennlastbetrieb umgeschaltet.

Brennstoffzuführung. Zur Brennstoffbevorratung und zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs wurde eine separate Austrageinrichtung verwendet (Eigenbau Landtechnik

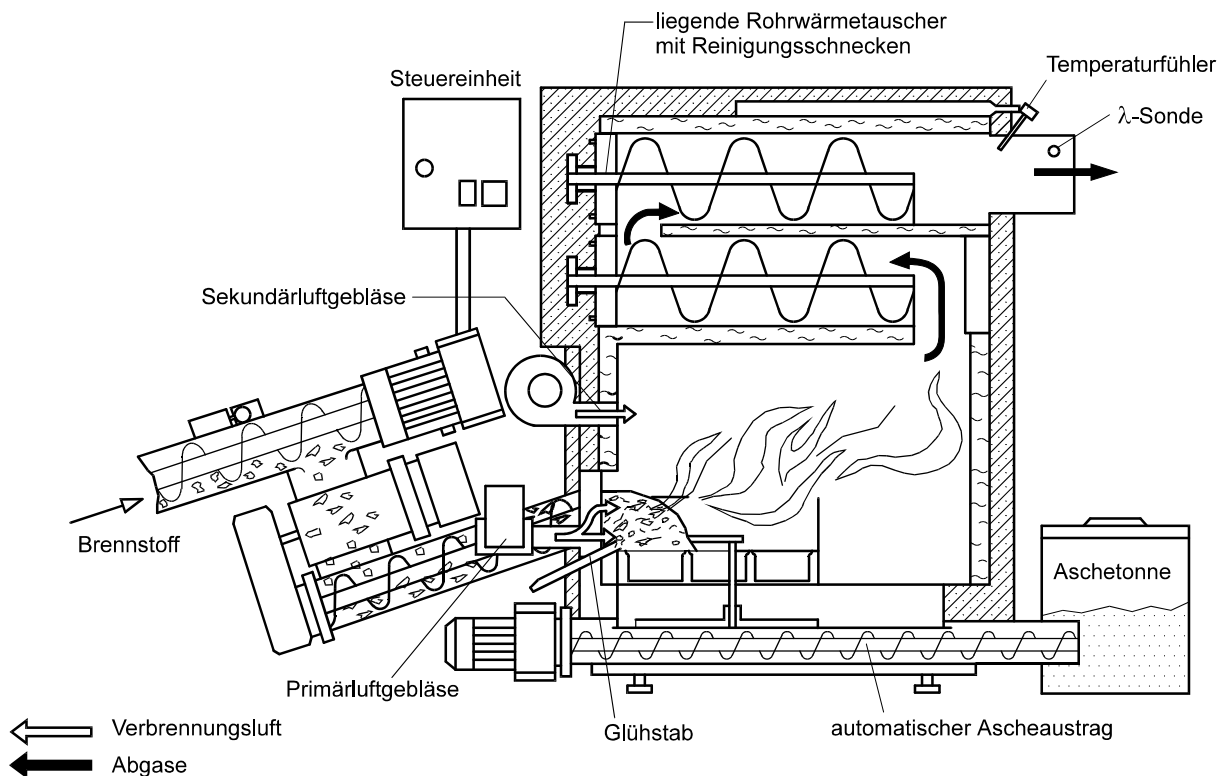


Abb. 6 Schematische Darstellung des Hackgutkessels HSK-RA-50 (Heizomat)

Weihenstephan). Diese Vorrichtung besteht aus einem Tagesvorratsbehälter und einer stufenlos einstellbaren Austragsschnecke, die von der Regelung der Feuerungsanlage angesteuert wurde. Zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs über den jeweiligen Auswertzeitraum war die Zuführungseinrichtung an einer Wägezelle aufgehängt.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Anlagentechnische Merkmale der Hackgutfeuerung HSK-RA 50 (Heizomat)

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Hackgutfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	Einschub mit luftgekühltem Rost
Brennstoffzufuhr	automatisch
Entaschung	automatischer Ascheaustrag mit Schnecken ¹⁾
Zündung	automatisch mit Glühstab
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Rohrwärmetauscher, liegend
Reinigung	automatisch mit "Schnecken-turbulatoren" ¹⁾
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	beidseitig am Eintritt der Stokerschnecke über Düsenbohrungen
Sekundärluftzufuhr	beidseitig im oberen Bereich der Brennkammer
Gebläse	je ein Druckgebläse
Luftmengenanpassung	Primär- und Sekundärluftgebläsedrehzahl
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur, Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoff- und Primärluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Lambda und Abgastemperatur
Stellgrößen	Sekundärluftmenge

¹⁾ wurde während des Probenahmezeitraumes deaktiviert

4.4 Versuchsbrennstoffe

Um den Einfluss unterschiedlicher Brennstoffeigenschaften bei den Verbrennungsversuchen auf die Beladung der Filterhülsen zu bestimmen, wurden für die Versuche schüttfähige Brennstoffe in unterschiedlichen Aufbereitungsformen mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet. Sie werden nachfolgend beschrieben.

4.4.1 Herkunft, Beschaffung und Aufbereitung

Zur Erzeugung von möglichst unterschiedlichem Material wurden bei der Herstellung zwei verschiedene Hackertypen verwendet. Fein- und Mittelhackgut wurden jeweils mit

einem Trommelhacker der Fa. Heizomat (Typ HM8-400, Leistung 120 KW) hergestellt. Dabei wurde das Feinhackgut bei der niedrigsten Einzugsgeschwindigkeit mit einem engen Quadratlochsieb (Lochdurchmesser 25 mm) gehackt, während das Mittelhackgut mit der höchsten Einzugsgeschwindigkeit und einem weiten Quadratlochsieb (Lochweite 58 mm) hergestellt wurde. Die Brennstoffe selbst stammen aus unterschiedlichen Quellen, die die Bandbreite der möglichen Brennstoffeigenschaften abdecken soll. Einen Überblick über die Art und Herkunft der Brennstoffe gibt Tabelle 3.

Tabelle 3 Merkmale und Herkunft der bei den Versuchen verwendeten Brennstoffe

Gruppe	Brennstoff	Aufbereitung	Größe	Proben-Nummer	Wassergehalt [%]	Herkunft	Bemerkungen
Holzhack schnittzel	Buche	Hackgut	fein	05A	38,3	Scheuern	Prügel, entastet; im Oktober 2000 geschlagen, gehackt am 13.12.00; mit feinem Sieb (Quadratloch 25 mm); geringste Einzugsgeschwindigkeit, Stammdurchmesser ca. 7,1 cm
				05G	9,2		Nachtrocknung
			mittel	06A	37,8	Scheuern	Prügel, entastet; im Oktober 2000 geschlagen, gehackt am 13.12.00; mit grobem Sieb (Quadratloch 58 mm); höchste Einzugsgeschwindigkeit, Stammdurchmesser ca. 7,1 cm; Wassergehalt ca. 41,3 %
				06B	8,9		Nachtrocknung
	BucheTh		fein	06C	34,8		Nachtrocknung
				27A	13,7	TLL-Dornburg	
	Fichte		fein	02A	39,8	Kranzberger Forst	Fichtenstangen, frisch gekackt (13.11.00) mit feinem Sieb, Quadratloch 25 mm, niedrigste Einzugsgeschwindigkeit; Stammdurchmesser ca. 14,2 cm, Nachtrocknung
				02F	10,3		
			mittel	03A	48,3	Kranzberger Forst	Fichtenstangen, frisch gekackt (13.11.00) mit grobem Sieb, Quadratloch 58 mm, höchste Einzugsgeschwindigkeit; Stammdurchmesser ca. 14,2 cm, Nachtrocknung
				03G	10,7		
	Fichte Th		fein	29A	25,7	TLL-Dornburg	
	Nadelreiche Fichte		mittel	04B	12,1	Kranzberger Forst	Wipfelholz mit viel Nadeln, frisch gekackt (13.11.00) mit grobem Sieb, Quadratloch 58 mm, getrocknet an der LBP
	Pappel		fein	07B	6,5	LWF, Kurzumtrieb	Stangen entastet; gehackt am 13.12.00; mit feinem Sieb (Quadratloch 25 mm); geringste Einzugsgeschwindigkeit, Nachtrocknung
Pappel Th	fein	28A	15,9	TLL-Dornburg			
Weide	fein	23B	8,8	Haigenhausen	gehackt mit 35 mm Sieb; Nachtrocknung		
		23C	36,6		gehackt mit 35 mm Sieb;		
Rinde	Fichtenrinde	Hackgut	fein	25B	40,7	k.A.	grobe Rinde gehackt
				25C	23,4		Nachtrocknung
				25D	13,9		Nachtrocknung
	Kieferrinde		fein	24A	51,2		Nachtrocknung
				24B	12,3	Sägewerk	Nachtrocknung (Zwangsbelüftung, 35 °C)
		24C	40,3		Nachtrocknung		

(Fortsetzung nächste Seite)

(Fortsetzung der Tabelle)

Gruppe	Brennstoff	Aufbereitung	Größe	Proben-Nummer	Wassergehalt [%]	Herkunft	Bemerkungen
Sonstige Holz-brennstoffe	Holzpellets	Pellet	fein	14A	8,9	Fa. Pellis	Durchmesser 6 mm; nach DIN 51731, Lieferung Fa. Umdasch, Österreich
	Schwarte	Hackgut	fein	08A	39,5	Sägewerk	Schwartenholz, ca. 1 Jahr abgelagert, entrindet; gehackt mit feinem Sieb (Quadratloch 25 mm); geringste Einzugsgeschwindigkeit
				08B	7,4		Nachtrocknung
				08C	28,1		Nachtrocknung
	Straßengrün-schnitt	Hackgut	mittel	09A	37,6	Sägewerk	Schwartenholz, ca. 1 Jahr abgelagert, entrindet; gehackt mit grobem Sieb (Quadratloch 58 mm); höchste Einzugsgeschwindigkeit
				09B	10,8		Nachtrocknung
				09C	37,6		Nachtrocknung
	Sägespäne	Späne	fein	12A	49,2	Ingolstadt	Straßenbegleithölze, Straßenbauamt Ingolstadt
				12B	8,8		Nachtrocknung an der LBP (Zwangselüftung)
				12C	43,0		Nachtrocknung (mitteltrockene Variante)
Hobelspäne	Späne	fein	13A	37,2	k.A.	frisches Sägemehl	
			13B	8,1		Nachtrocknung an der LBP	
Halmgut	Stroh	Häcksel	fein	16B	10,6	LTW	Schreinerei Landtechnik-Werkstatt
	Stroh-GP	Pellet		22A	12,6	Grub	Gerstenstroh
	Miscanthus	Häcksel		17B	11,5	k.A.	20 mm Durchmesser; ohne Zusatzstoffe, hoher Schmutzanteil (Aschegehalt)
Körner und Ölkuchen	Triticale	Korn	fein	26A	11,5	LBP	Versuchsflächen LBP
	Rapspresskuchen	Pellet		21A	11,4	Grub	Triticalekörner
Sonder-verseuche	Kiefferrinde Straßengrün-schnitt Pappel Pappel Pappel mit Rinde Kiefferrinde mit Fichte Straßengrün-schnitt	Hackgut	fein	20A	10,2	LTW	eigene Herstellung, mechanische Ölpressen, kalte Pressung
				01V	34,5	s.o.	Mischungen aus vorgenannten Brennstoffen
				02V	34,5		
				02V	34,5		
				03V	32,3		
				03V	32,3		
				03V	32,3		
04V	46,2						

^a Hackgut aus Herstellung mit Trommelhacker mit Quadratlochsiebdurchmesser (25 mm) und niedrigster Einzugsgeschwindigkeit

^b Hackgut aus Herstellung mit Trommelhacker mit Quadratlochsiebdurchmesser (58 mm) und höchster Einzugsgeschwindigkeit

^c Hackgut mit Schneckenhacker hergestellt

^d LWF = Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft

4.4.2 Heizwert und Aschegehalt

Die Heizwerte und Aschegehalte aller 47 Versuchsbrennstoffe zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4 Gemessene Heizwert und Aschegehalte der eingesetzten Brennstoffe

Gruppe	Brennstoff	Aufbereitung	Größe	Proben Nummer	Heizwert $H_{u,roh}$ (kJ/kg _{FM})	Aschegehalt (%)
Trockene Brennstoffe w ≤ 20 %						
Holzhack schnitzel	Buche BY	Hackgut	fein	05G	16501	0,77
			mittel	06B	16557	0,77
	Buche TH		fein	27A	15553	1,77
	Fichte		fein	02F	16628	0,64
			mittel	03G	16545	0,65
	Nadelreiche Fichte		mittel	04B	16254	2,06
	Pappel BY		fein	07B	17111	1,71
Pappel TH	fein	28A	15145	3,10		
Weide	fein	23B	16575	3,52		
Rinde	Fichtenrinde	Hackgut	fein	25D	16192	8,18
	Kiefernrinde			24B	16538	2,15
Sonstige Holz-brenn-stoffe	Holzpellets	Pellet	fein	14A	17161	0,27
	Schwarte	Hackgut	fein	08B	17247	0,81
			mittel	09B	16524	0,28
	Straßengrünschnitt	Späne	fein	12B	16969	4,76
	Sägespäne		fein	13B	17116	0,84
Hobelspäne	fein		16B	16584	0,41	
Halmgut	Stroh	Häcksel	fein	22A	14716	5,55
		Pellet		17B	14932	6,80
	Miscanthus	Häcksel		26A	14932	4,14
Körner und Ölkuchen	Triticale	Korn	fein	21A	14695	2,23
	Rapspresskuchen	Pellet		20A	19075	6,52
Feuchte Brennstoffe w > 20 %						
Holzhack schnitzel	Buche BY	Hackgut	fein	05A	10424	1,31
			mittel	06A	10284	1,02
	mittel		06C	11160	1,01	
	Fichte		fein	02A	10060	0,65
			mittel	03A	8551	0,56
FichteTH	fein	29A	13356	1,05		
Weide	fein	23C	10758	3,53		
Rinde	Fichtenrinde	Hackgut	fein	25B	10392	7,05
				25C	14136	7,57
	Kiefernrinde			24C	10479	2,22
				24A	8120	2,72
Sonstige Holz-brenn-stoffe	Schwarte	Hackgut	fein	08A	10424	0,92
				08C	12839	0,65
				mittel	09A	10528
	Straßengrünschnitt		mittel	09C	11034	0,36
			fein	12A	8151	3,70
Sägespäne	Späne	fein	12C	9444	3,54	
Sonder-versuche	Kiefernrinde	Hackgut	fein	01V	11734	---
	Straßengrünschnitt			02V	8553	---
	Pappel			02V	8553	---
	Pappel			03V	11953	---
	Pappel mit Rinde			03V	11953	---
	Kiefernrinde mit Fichte			03V	11953	---
	Straßengrünschnitt			04V	9008	---

4.5 Versuchsprogramm (Übersicht)

Um die in Kapitel 2 definierten Ziele zu erreichen, wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, durch das eine möglichst große und repräsentative Bandbreite von Staubkonzentrationen im Abgas erzeugt werden konnte, um so den vielfältigen Einflussgrößen des Brennstoffs möglichst umfassend Rechnung zu tragen. Entsprechend wurden die möglichen Brennstoffmerkmale weitestmöglich variiert, indem die

- Brennstoffarten (Holz, Rinde, Halmgut, etc.),
 - der Aschegehalt (zufällige Abstufungen je nach Brennstoffart und Herkunft),
 - der Wassergehalt (zufällige Abstufung durch Nachrocknung frischer Holzbrennstoffe)
 - und die Brennstoffstruktur (fein bzw. mittelgrob, durch unterschiedliche Zerkleinerung)
- systematisch abgestuft wurden.

Der dazu aufgestellte Versuchsplan ist in Tabelle 5 dargestellt. Ohne die Sonderversuche wurden in der Untersuchung mit insgesamt 44 verschiedenen Brennstoffvarianten jeweils meist drei Wiederholungen, d. h. insgesamt mehr als 120 Probenahmen mit jedem der drei parallel eingesetzten Staubprobenahmegeräte durchgeführt (Tabelle 5). Bei diesen Brennstoffvarianten erfolgte vor Beginn der drei aufeinander folgenden Staubprobenahmen jeweils eine individuelle Optimierung des Verbrennungsprozesses durch gezieltes Einstellen der Anlage auf den jeweiligen Brennstoff.

Zusätzlich zu diesen Brennstoffen wurden weitere Sonderversuche (Tabelle 5) durchgeführt, in denen eine gezielte Überschreitung der Staubgrenzwerte mit Holzbrennstoffen angestrebt wurde. Hierzu wurden die Stellparameter der Feuerungsanlage (Luft- und Brennstoffmenge) gezielt verändert, so dass sich suboptimale Verbrennungsbedingungen an der gewählten Hackschnitzelfeuerung einstellten. Zusammen mit diesen Sonderversuchen wurden insgesamt über 139 Staubhülsen mit dem Kaminkehrer-Messgerät beprobt; zusammen mit den Quarzfaserhülsen der beiden übrigen Probenahmegeräte betrug die Gesamtanzahl der ausgewerteten Staubmesshülsen 410.

Tabelle 5 Versuchsplan

Gruppe	Brennstoff	Aufbe- reitung	Korngröße	Proben- nummer	Wasserge- halt [%]	Anzahl Wie- derholungen
Trockene Brennstoffe w <= 20 %						
Holzhack- schnitzel	Buche BY	Hackgut	fein	05G	9,2	3
			mittel	06B	8,9	3
	BucheTH		fein	27A	13,7	3
	Fichte		fein	02F	10,3	3
			mittel	03G	10,7	3
	Nadelreiche Fichte		mittel	04B	12,1	3
	Pappel BY		fein	07B	6,5	3
PappelTH	fein	28A	15,9	3		
Weide	fein	23B	8,8	3		
Rinde	Fichtenrinde	Hackgut	fein	25D	13,9	3
	Kiefernrinde		24B	12,3	3	
Sonstige Holzbrenn- stoffe	Holzpellets	Pellet	fein	14A	8,9	3
	Schwarte	Hackgut	fein	08B	7,4	2
			mittel	09B	10,8	4
	Straßengrünschnitt	Späne	fein	12B	8,8	3
	Sägespäne		fein	13B	8,1	3
Hobelspane	fein		16B	10,6	4	
Halmgut	Stroh	Häcksel		22A	12,6	3
		Pellet	fein	17B	11,5	3
	Miscanthus	Häcksel		26A	11,5	3
Körner und Ölkuchen	Triticale	Korn		21A	11,4	3
	Rapspresskuchen	Pellet	fein	20A	10,2	3
Feuchte Brennstoffe w > 20 %						
Holzhack- schnitzel	Buche BY	Hackgut	fein	05A	38,3	3
			mittel	06A	37,8	3
			mittel	06C	34,8	3
	Fichte		fein	02A	39,8	3
			mittel	03A	48,3	2
	FichteTH		fein	29A	25,7	3
Weide	fein	23C	36,6	3		
Rinde	Fichtenrinde	Hackgut		25C	23,4	3
			fein	25B	40,7	3
			24C	40,3	3	
	Kiefernrinde		24A	51,2	3	
Sonstige Holzbrenn- stoffe	Schwarte (Fichte)	Hackgut	fein	08A	39,5	4
				08C	28,1	3
			mittel	09A	37,6	4
			09C	37,6	3	
	Straßengrünschnitt		fein	12A	49,2	3
				12C	43,0	3
Sägespäne	Späne	fein	13A	37,2	3	
Sonder- versuche	Kiefernrinde	Hackgut		01V	34,5	4
	Straßengrünschnitt			02V	34,5	2
	Pappel			02V	34,5	2
	Pappel		fein	03V	32,3	1
	Pappel mit Rinde			03V	32,3	1
	Kiefernrinde mit Fichte			03V	32,3	3
	Straßengrünschnitt			04V	46,2	3
Summe				47		139

4.6 Versuchsdurchführung

4.6.1 Inbetriebnahme und Vorversuche

Die Versuchsvorbereitungen und Vorversuche (Brennstoffbeschaffung und -aufbereitung, Messtrecke optimieren und Anpassen, Strömungsprofile erstellen, Testphasen für Messgeräte etc.) erstreckten sich von Dezember 2000 bis Mitte Februar 2001. Die Feuerungsanlage wurde auf dem Prüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik aufgebaut und im Beisein eines Vertreters des Herstellers in Betrieb genommen.

In den Vorversuchen wurden mehrere Temperaturprofile in den vorgesehenen Messebenen ermittelt, um den Kernstrom des Abgases zu bestimmen. Die Bestimmung des Kernstromes diente der späteren Ausrichtung der Sonden im Abgasrohr (vgl. hierzu Kapitel 4.1.2).

Die Feuerungsanlage wurde gemäß der Bedienungsanleitung betrieben. Die Regelungsparameter der Feuerungen entsprachen den vorgegebenen Werkseinstellungen.

Die Feuerung wurde mit den Versuchsbrennstoffen auf einen Bereich zwischen 40 und 45 kW eingestellt, das entspricht 80 bis 90 % der Nennwärmeleistung. Dabei wurde als Optimierungsgröße im Rahmen der technischen Möglichkeiten ein minimaler CO-Gehalt bei größtmöglichem CO₂-Gehalt im Abgas angestrebt. Die Einstellung der Anlage auf die verschiedenen Brennstoffe erfolgte im wesentlichen durch Anpassung der Takt- und Pausenzeit der Zufuhrschnecke, die zuvor in Förderversuchen ermittelt worden waren, sowie der Mindestdrehzahl der beiden Verbrennungsluftgebläse an die erforderliche Wärmeleistung.

4.6.2 Durchführung der Verbrennungsversuche

Die Verbrennungsversuche wurden nach Abschluss der Vorbereitungen über den Zeitraum von Ende Februar 2001 bis Ende Mai 2001 durchgeführt. Die Durchführung wird nachfolgend beschrieben.

Anheizen und Beharrungszustand. Nach dem Befüllen des Tagesvorratbehälters mit Referenzbrennstoff wurde die Feuerungsanlage eingeschaltet und damit das Zündprogramm der elektronischen Verbrennungsregelung gestartet. Die Steuerung leitete die automatische Zündung ein.

In der Phase des Anheizens erfolgte lediglich eine Zirkulation des Heizwassers im Kühlkreislauf. Die Kaltwassereinspeisung wurde erst ab einer Kesselwassertemperatur von ca. 60 °C zugeschaltet. Dabei wurde der Kaltwasserdurchfluss auf die im Beharrungszustand erforderliche Wärmeleistung eingeregelt. Aufgrund der vorgesehenen Versuche mit feuchtem Brennstoff wurde für alle Brennstoffe ein Wärmeleistungsbereich zwischen 40 und 45 kW angestrebt. Die Vorlauftemperatur lag gemäß DIN EN 303-5 /2/ im Mittelwert zwischen 70 und 90 °C, und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf betrug 10 bis 25 °C.

Der Beharrungszustand war erreicht, nachdem die Betriebs- und Abgasparameter einen annähernd gleichmäßigen Verlauf bei der angestrebten Wärmeleistung zeigten. Bei den

durchgeführten Verbrennungsversuchen wurde dieser Betriebszustand nach etwa einer Stunde erreicht.

Durchführung der Messungen. Nach Erreichen des Beharrungszustands oder nach einem Brennstoffwechsel wurde der Vorratsbehälter mit dem Versuchsbrennstoff befüllt. Nun wurde eine weitere Stunde abgewartet, bis der Brennstoff in ausreichender Menge verbrannt war und die Anlage auf den Brennstoff eingestellt werden konnte. Maßgebend war dabei die angestrebte Wärmeleistung. Vor Beginn der Staubprobenahme wurden die Reinigungseinrichtungen der Feuerungsanlage (Wirbulatorschnecken, Ascheräumer auf dem Rost und Ascheaustragung) für etwa eine Minute betätigt. Über die Dauer der Probenahme waren die Reinigungseinrichtungen dann abgeschaltet.

Anschließend wurde die Messwertaufzeichnung gestartet und die Staubprobenahme durchgeführt. Zu jeder Versuchsvariante erfolgten anschließend mit jedem Probenahmegerät zwei weitere Wiederholungsmessungen über die gleiche Dauer und unter gleichen Betriebsbedingungen. Zu jedem Brennstoff wurden somit in der Regel 9 Staubhülsen beprobt. Aufgrund von brennstoffbedingten Störungen in der Zuführung traten während der einzelnen Probenahmen zeitweise Phasen mit schwankenden Betriebszuständen auf. Somit war es nicht möglich, alle Wiederholungsmessungen über den gesamten Probenahmezeitraum unter exakt identischen Bedingungen zu fahren.

Abschalten und Beenden. Nach Abschluss der letzten Probenahme wurde die Messwertaufzeichnung beendet und die Feuerungsanlage ausgeschaltet. Die Feuerungsanlage wurde über das Kühlsystem nachgekühlt, um ein nachträgliches Überhitzen zu verhindern. Insgesamt betrug die Betriebszeit der Feuerungsanlage während eines Verbrennungsversuches bzw. Versuchsvariante rund 2 Stunden.

Wassergehaltsänderung. Bei den Versuchen zum Wassergehaltseinfluss in der Hackschnittzelfeuerung war eine Anpassung der Einstellungen an die unterschiedlichen Wassergehalte erforderlich. Die für lufttrockenes Fichtenhackgut ($w = 15\%$) gefundene Einstellung des Brennstoffmassenstromes musste aufgrund des geringeren Heizwertes bei feuchtem Hackgut erhöht werden. Ähnliche Veränderungen wurden auch für die Gebläse-Mindestdrehzahl vorgenommen. Die CO-Emissionen, auf die sich die Feuerungsanlage schließlich auch beim hohen Wassergehalt im Versuch einregeln ließ, kann als die geringstmögliche mit diesem Brennstoff betrachtet werden.

Sonderversuche. Bei den Sonderversuchen wurden die Parameter der Feuerungsanlage gezielt verstellt, um eine fehlerhafte Betriebsweise zu simulieren. Hierbei wurde versucht, über die Gebläse-Mindestdrehzahl, die Luft- und Brennstoffmenge die Verbrennungsqualität so zu reduzieren, dass eine erhöhte Partikelbeladung im Abgas durch unvollständige Verbrennung zu erwarten war. Als Indikator für diese Betriebszustände wurde der CO-Gehalt im Abgas herangezogen. Da es hierbei nicht auf eine Beurteilung der Brennstoffe selbst ankam sondern auf eine möglichst große Bandbreite bei den Wertepaaren bestehend aus den Staubmessungen einerseits und den Differenzdruckmessungen andererseits, wurde für jede Einstellung nur eine Probenahme durchgeführt.

4.7 Auswertung

Zur Auswertung und Verrechnung der Mess- und Analysedaten wurde die an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelte Auswertungsdatei FMDA 9.3 zusammen mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel 5.0 verwendet. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

4.7.1 Abgas (CO, VOC)

Schadstoffemissionen. In einem ersten Auswertungsschritt wurden die Abgaskenngrößen als Minutenmittelwerte aus den Messwerten berechnet. Anschließend wurden Mittelwerte der berechneten und gemessenen Werte über die Dauer der Staubprobenahme (15 min) gebildet. Die erfassten Schadstoffemissionen wurden als Massenkonzentrationen (mg/Nm^3 bei 13 % O_2) ausgewiesen.

Neben der tabellarischen Ausgabe in formatierten Datenblättern erfolgte eine graphische Darstellung ausgewählter Messgrößen als Zeitverläufe, um bei der Datenauswertung eine Identifikation eventueller Unregelmäßigkeiten zu ermöglichen.

Wärmeleistung und Wirkungsgrad. Mit den Daten zur Brennstoffzusammensetzung und den Momentanwerten der Abgaskenngrößen und Temperaturen erfolgte die Berechnung der Feuerungswärmeleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrads. Der Kesselwirkungsgrad wurde ebenfalls gemessen (nach der direkten Methode, gemäß den Berechnungsvorgaben der DIN EN 303-5 /2/); die verbrauchte Brennstoffmasse wurde hierfür durch Wägung des Vorratsbehälters vor und nach den Probenahmezeiträumen bestimmt. Aufgrund der kurzen Messintervalle war die Brennstoffmassenermittlung jedoch mit großer Unsicherheit behaftet, so dass diese Ergebnisse hier nicht ausgewertet werden konnten.

4.7.2 Gesamtstaub

Gesamtstaubgehalt nach VDI 2066. Die Auswertung der Staubprobenahme erfolgte in eigenen Berechnungsblättern. Dabei wurden zuerst die abgesaugten Normvolumina aus den gemessenen Gasmengen und Gaszuständen bestimmt. Mit diesen Zwischenergebnissen wurden dann die ermittelten Staubmengen der Hülsen auf Massenkonzentrationen umgerechnet.

Die Filtermedien wurden im Trockenschrank bei 240 °C eine Stunde lang ausgeheizt. Anschließend wurden sie im Exsikkator über eine weitere Stunde abgekühlt und konditioniert, bevor sie einzeln entnommen, mit einer Präzisionswaage gewogen und bis zur weiteren Verwendung staubfrei gelagert wurden. Die belegten Filter wurden wiederum im Trockenschrank bei 105 °C eine Stunde lang getrocknet, eine weitere Stunde im Exsikkator konditioniert und abschließend auf der Waage zurückgewogen. Um die Genauigkeit der Wägung bewerten zu können, wurden bei jedem Filtersatz von 20 Hülsen drei Leerhülsen mitgewogen. Die Abweichung der Messung für diese Referenzhülsen wurden in die Auswertung der beprobten Hülsen eingerechnet (Mittelwert von 3 Hülsen).

Gesamtstaubgehalt nach ZIV-Methode. Die vorbereiteten Filter wurden beim Zentralinnungsverband des Deutschen Schornsteinfegerhandwerks in St. Augustin (ZIV) be-

stellt. Vor der Verwendung wurde das Leergewicht der ZIV-Filterhülsen ermittelt. Damit die Filterhülsen durch eine zusätzlich erforderliche Trocknungsprozedur nicht beeinträchtigt werden konnten, wurden sie vor dem Wiegen in den geöffneten Transporthülsen ca. 24 h im Exsikkator belassen. Zum Abwiegen wurden die Hülsen danach dem Exsikkator entnommen und unmittelbar anschließend in den Transporthülsen eingeschlossen. Nach Beenden der Probenahme (Staubmessung) wurden die beladenen Filter unmittelbar anschließend aus der Sonde entnommen und in die dichtschießenden Transporthülsen zurückgestellt. Dort wurden sie bis zur anschließenden Auswertung gelagert. Zur Bestimmung des Beladungsgewichtes wurden die Hülsen vorher wiederum über 24 h im Exsikkator konditioniert und unmittelbar nach der Entnahme zurückgewogen. Für jeden Hülsensatz wurden auch hier bis zu drei unbeladene Leerhülsen ausgewertet. Dieser Mittelwert wurde in die Auswertung der beprobten Hülsen eingerechnet.

Druckverlust "Delta-p". Bei der Auswertung der Druckverläufe wurden zu jeder Messreihe aus dem Anfangs- und Enddruck die Druckdifferenz bestimmt. In einigen Fällen (insgesamt 15-mal) verzögerte sich der Beginn der Messwertaufzeichnung, da dieser bei dem eingesetzten Prototyp abhängig war von dem Erreichen eines bestimmten Schwellenwertes (ca. 10 mbar). In solchen Fällen wurde dadurch bei Messende ein Einbruch der Druckdifferenz aufgezeichnet, da die voreingestellte Absaugdauer bereits beendet war, obwohl die voreingestellte Aufzeichnungsdauer für den Differenzdruck (900 s) erst einige Sekunden später erreicht war. In diesen Fällen wurde der vor dem Druckabfall erreichte Maximalwert für die Auswertungen herangezogen. Damit für jede Messung ein einheitlicher Messzeitraum ausgewertet werden konnte, wurde der Verlauf der Druckdifferenz für die verbliebene Zeit bis 900 Sekunden extrapoliert.

Um solche Auffälligkeiten zuverlässig feststellen zu können, wurden sämtliche Differenzdruck-Messwerte im Zeitverlauf grafisch dargestellt. Einige Beispiele für solche grafischen Darstellungen zeigt Abb. 7.

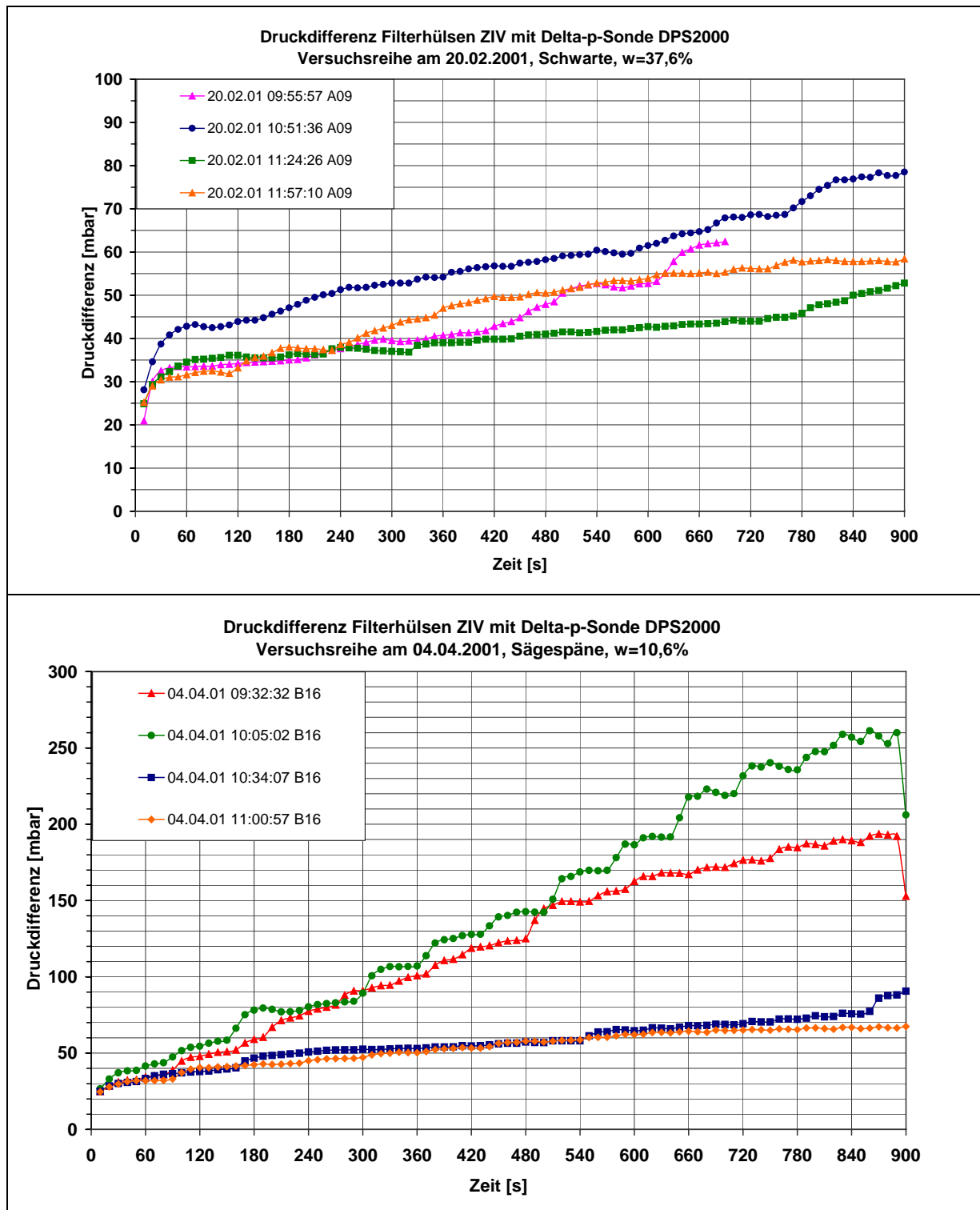


Abb. 7 Beispiele für Differenzdruckmessungen im Zeitverlauf

5 Ergebnisse und Diskussion

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse für die Differenzdruckbestimmung und der Vergleich der verschiedenen Emissions-Messverfahren sowie die gemessenen Aschegehaltseinflüsse dargestellt. Für alle diese Schwerpunkte gilt generell, dass die Anzahl der tatsächlich für die Auswertungen zugrunde gelegten Werte bzw. Wertepaare je nach Datenparameter unterschiedlich sein können, obwohl alle hier betrachteten Messgrößen stets durchgehend in allen 139 Messungen bestimmt worden waren. Das liegt daran, dass Messgeräteausfälle oder versuchsbedingte Unregelmäßigkeiten gelegentlich zu einer Eliminierung nur eines Wertes führten, während die übrigen Messparameter des Versuchs dennoch für andere Auswertungen zur Verfügung stehen konnten.

5.1 Korrelation der Differenzdruckmessung mit anderen Messgrößen

Zwischen dem gemessene Differenzdruck und der gravimetrischen Staubmessung besteht eine klare Korrelation, die sich z. B. in Form einer linearen Regression beschreiben lässt (z. B. nach Gleichung (1) oder (2)).

Staubmessung nach Kaminkehrermethode (Wöhler SM96-CO):

$$E_B = -0,27 + 1,69 \times \Delta_p \quad (R^2 = 0,49) \quad (1)$$

Staubmessung nach VDI 2066 (im heißen Abgas):

$$E_B = 14,1 + 1,66 \times \Delta_p \quad (R^2 = 0,39) \quad (2)$$

mit:

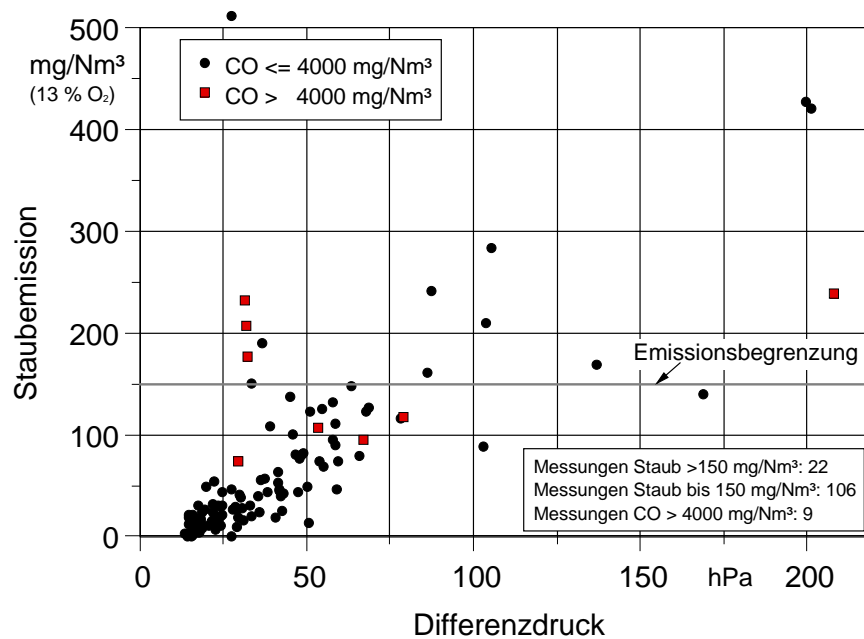
E_B = Staubemission in mg/Nm³ (bei 13 % O₂)

Δ_p = Differenzdruck in hPa

Beide Regressionsfunktionen sind statistisch gesehen hochsignifikant, wobei die Reststreuung – ausgedrückt durch die Differenz des Bestimmtheitsmaßes (R^2) zum Wert 1,0 – bei der Messung nach VDI 2066 größer ist als bei der Bestimmung nach der Kaminkehrermethode. Diese Beobachtung lässt sich durch die Tatsache erklären, dass es sich bei der Kaminkehrermethode um genau dieselbe Filterhülse handelte, an der auch der Differenzdruck Δ_p gemessen wird, während bei der VDI-Methode sowohl der Messpunkt als auch die Filterhülse verschieden sind, wodurch zusätzliche Streuursachen z. B. durch Strähnenbildung im Abgas oder abweichende Filtereigenschaften in Kauf zu nehmen sind. Eine grafische Darstellung der beiden Messwertkorrelationen bietet Abb. 8.

Messungen, bei denen der Grenzwert für Kohlenmonoxid (CO) von 4 000 mg/Nm³ überschritten war, sind darin besonders hervorgehoben. Diese Werte wurden bei der Berechnung der oben dargestellten Regressionsfunktionen nicht berücksichtigt, da hohe

Staubmessung nach Kaminkehrermethode (Wöhler SM96-CO):



Staubmessung nach VDI 2066 (im heißen Abgas):

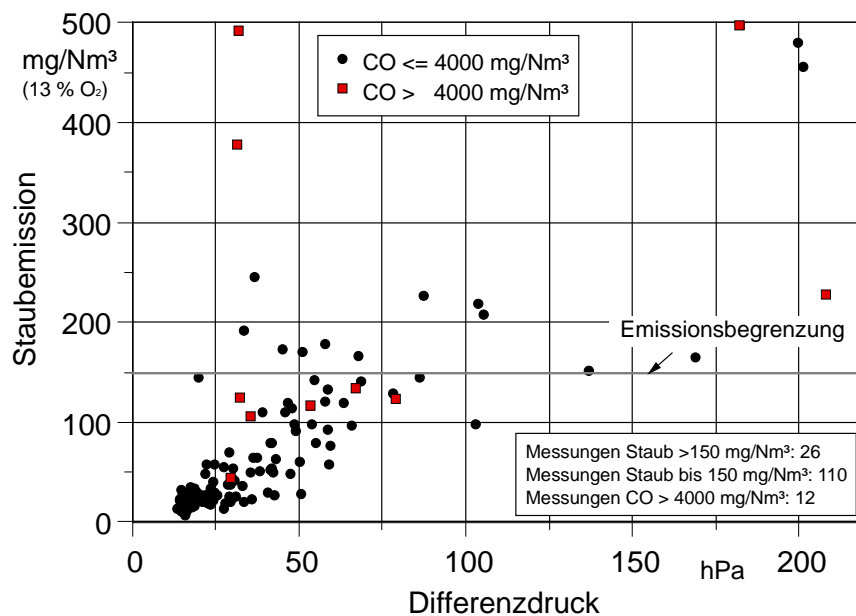


Abb. 8 Abhängigkeit der gravimetrisch gemessenen Staubemission mit Kaminkehrerge­rät (oben) bzw. nach VDI 2066 (unten) vom Differenzdruck nach Delta-P-Methode (CO-Messungen nach Kaminkehrermethode Wöhler SM96-CO)

Kohlenmonoxidwerte offenbar zu einer großen Messunsicherheit beim Delta-P-Wert beitragen.

Aus diesem Grund – und aufgrund der insgesamt hohen Messwertstreuung – lässt sich die Differenzdruckmessung nicht mit ausreichender Genauigkeit in eine äquivalente Massenbelastung umrechnen. Die Zielsetzung für die vorliegende Untersuchung bestand aber auch nicht darin, dass das gravimetrische Verfahren zur Überprüfung der Emis­si-

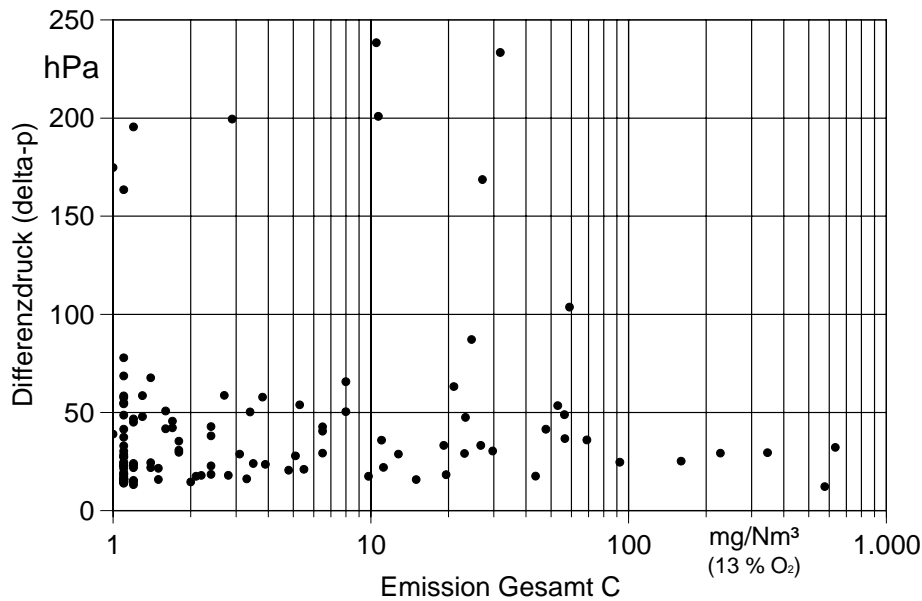


Abb. 9 (fehlende) Korrelation der Messwerte für Gesamt-C und Differenzdruck

onsanforderungen durch die Delta-p-Methode gänzlich ersetzt werden sollte. Vielmehr liegt der Nutzen des Verfahrens in der Möglichkeit, durch eine Schwellenwertüberwachung direkt vor Ort eine frühzeitige Abgrenzung "staubsauberer" Anlagen von "staubkritischen" Anlagen durchzuführen. Über die Identifikation eines solchen geeigneten Schwellenwertes wird in Kapitel 5.2 berichtet.

Im Zuge der Versuchsvorbereitungen und Überlegungen über Einflussgrößen auf den Delta-P-Messwert war in der Bildung von langkettigen Kohlenwasserstoffen ein Risiko für die Messgenauigkeit gesehen worden, da diese aufgrund der Feinkörnigkeit der gebildeten festen oder flüssigen Partikel mutmaßlich zu einer höheren Filterverstopfung beitragen, was sich letztlich in einem höheren gemessenen Differenzdruck niederschlagen würde. Gleiche Überlegungen waren auch für eventuelle Rußfrachten angestellt worden, da diese als Produkt einer unvollständigen Verbrennung im Abgas zu einer erhöhten Staubkonzentrationsanreicherung beitragen können. Ein Zusammenhang zwischen der Konzentration von Partikeln aus unvollständigem Ausbrand und dem hier gemessenen Differenzdruck konnte jedoch im vorliegenden Vorhaben nicht nachgewiesen werden. Das zeigt die Darstellung der Messwerte in Abb. 9, in der die Kohlenwasserstoffemission (Gesamt-C) als Indikator für eine solche Ruß- und/oder Teerkonzentration im Abgas hinsichtlich einer Korrelation mit der Delta-P-Messung überprüft wurde.

Der Ausstoß von flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen korreliert statt dessen mit der Emission von Kohlenmonoxid (CO), allerdings muss hierzu erst ein bestimmter Schwellenwert erreicht werden. Das geht aus den Korrelationsergebnissen hervor, die in Abb. 10 dargestellt sind. Dieser Schwellenwert ist bei ca. 500 mg CO/Nm³ anzusiedeln. Bei den Berechnungen in Abb. 10 wurden sämtliche Werte, die unterhalb von 2 mg/Nm³ lagen, in der Regressionsanalyse nicht berücksichtigt, da diese Werte unterhalb der Ansprechempfindlichkeit des Messgerätes lagen.

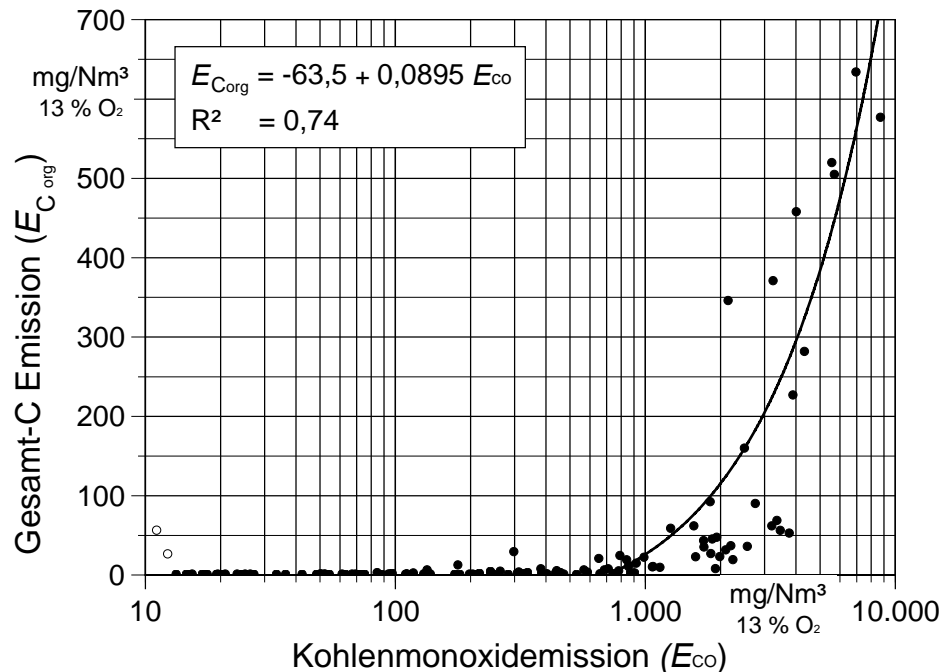


Abb. 10 Ausstoß von flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (C_{org}), angegeben als Ges.-C bei unterschiedlichen Kohlenmonoxidemissionen einer 50 kW Hack-schnitzelfeuerung

5.2 Identifikation eines Schwellenwertes S_p für den Differenzdruck (Delta-p)

Ziel und Nutzen des Delta-P-Verfahrens liegen in der Möglichkeit, durch eine Schwellenwertüberwachung direkt vor Ort eine frühzeitige Abgrenzung „staubsauberer“ Anlagen von "staubkritischen" Anlagen durchzuführen. Dadurch erfährt der Anwender das Ergebnis der Messung unmittelbar nach der Durchführung, so dass ihm ein direktes Einstellkriterium zur Fehlerbeseitigung bzw. zur Optimierung der Feuerungsanlage vorliegt. Er kann Beanstandungen vermeiden bzw. mehrere Wochen Wartezeit bis zur Beanstandung und Beseitigung der Ursachen einsparen.

Um die Tauglichkeit des Delta-p-Verfahrens für eine solche Verwendung beurteilen zu können, muss eine Analyse der Wahrscheinlichkeiten für eine Falschbeurteilung bei unterschiedlichen Schwellenwerten S_p durchgeführt werden. Dazu wurden zunächst alle gültigen 129 Versuche mit je drei Messwerten für delta-p gesamt (in hPa), Staub (Kaminkehrermethode, in mg/Nm³) und Kohlenmonoxid (ebenfalls Kaminkehrermethode, in mg/Nm³) betrachtet. Von diesen 129 Versuchen ergaben 9 Versuche eine Emissionsüberschreitung des CO-Grenzwerts von 4 000 mg/Nm³. Da diese Messwerte (bzw. Feuerungsanlagen) vor Ort ohnehin aufgrund ihres extrem hohen CO-Wertes beanstandet worden wären, verbleiben für die Delta-p-Methode 120 Versuche als Basisdatenmaterial. Für das hier vorliegende klassische Zwei-Klassen-Problem (Staubemission > oder ≤ 150 mg/Nm³), erscheint diese Stichprobenanzahl für die weitere Analyse ausreichend.

Um einen beliebigen Schwellenwert beurteilen zu können, müssen zunächst die Messungen, die jeweils als "Falschbeurteilung" zu werten sind, identifiziert werden. Zu dieser Vorgehensweise bietet Abb. 11 eine Erläuterung. In den darin dargestellten vier Quadranten werden die vier möglichen Kombinationen für eine Zuordnung der Staubemissions- (E_B) und Differenzdruck(Δp)-Messwerte aufgeführt. Dabei stellt S_p den zu findenden Grenzwert für die Schwellenwertüberwachung des Differenzdruckes und S_E den Emissionsgrenzwert von 150 mg/Nm^3 bei $13 \% \text{ O}_2$ dar. Liegt ein Wertepaar nach Abb. 11 im *Bereich I*, so ist die Staubgrenzwertüberschreitung nicht durch den Δp -Messwert zu erkennen. Für diesen Bereich muss folglich die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \Delta p \leq S_p\}$ durch geeignete Wahl von S_p minimiert werden. Die Schreibweise $P\{E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \Delta p \leq S_p\}$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis $E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$, wenn das Ereignis $\Delta p \leq S_p$ eingetreten ist. Aufgrund der großen Stichprobe lassen sich die Wahrscheinlichkeiten durch die entsprechenden Häufigkeiten beschreiben. Für den *Bereich I* in Abb. 11 gilt Gleichung (3) und (4):

$$P\{A \mid B\} = \frac{P\{A \cap B\}}{P\{B\}} \approx \frac{N_{A \cap B} / N_{\text{möglich}}}{N_B / N_{\text{möglich}}} \quad (3)$$

$$P\{A \mid B\} \approx \frac{N_{A \cap B}}{N_B} \quad (4)$$

mit:

$P\{A \mid B\}$: Wahrscheinlichkeit P für Ereignis A, wenn Ereignis B eingetreten ist

N_A, N_B : Anzahl der Ereignisse A, B

$A \cap B$: Ereignis A und B

A: Ereignis wenn $E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$

B: Ereignis wenn $\Delta p \leq S_p$

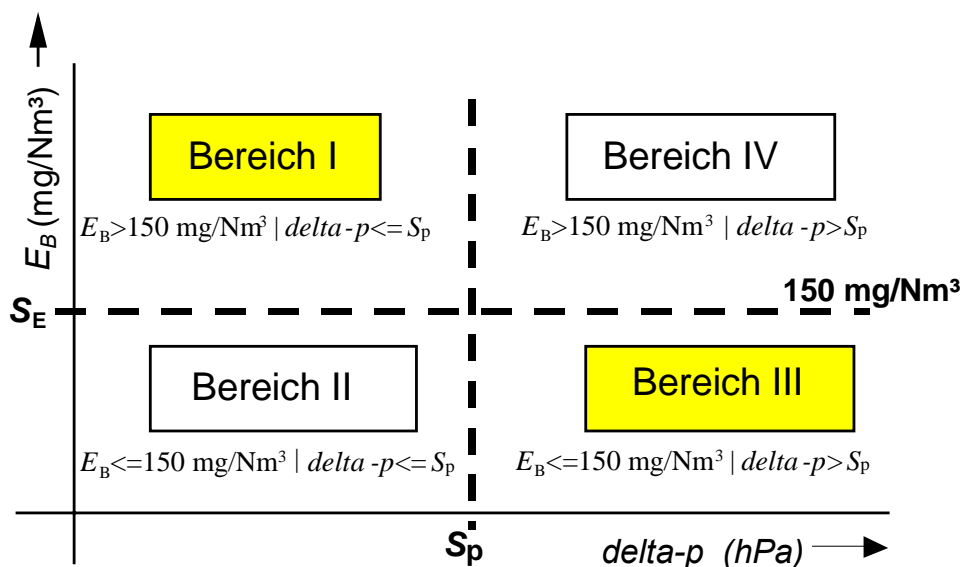


Abb. 11 Kombinationen von Druckdifferenz Δp und Staubemission E_B

Liegt ein Messwert nach Abb. 11 im *Bereich III*, so müsste die Filterhülse gravimetrisch analysiert werden, obwohl der Staubgrenzwert S_E nicht überschritten ist. Die Kostenfunktion $P\{E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \text{delta-}p > S_p\}$ muss daher ebenfalls durch geeignete Wahl des Differenzdruck-Schwellenwertes S_p minimiert werden. Analog dazu gilt Gleichung (5) für den *Bereich III* nach Abb. 11, der eine „unnötige“ gravimetrische Analyse beschreibt :

$$P\{C \mid D\} \approx \frac{N_{C \cap D}}{N_D} \quad (5)$$

mit:

$P\{C \mid D\}$: Wahrscheinlichkeit P für Ereignis C , wenn Ereignis D eingetreten ist

N_C, N_D : Anzahl der Ereignisse C, D

$C \cap D$: Ereignis C und D

C : Ereignis, wenn $E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$

D : Ereignis, wenn $\text{delta-}p > S_p$

Die Tabelle 6 zeigt ein Beispiel für die Ereignisanzahl in den Bereichen I bis IV der Abb. 11 bei einem angenommenen Schwellenwert von 75 hPa.

Tabelle 6 Beispiel für die Ereignisverteilung für den Schwellenwert $S_p = 75 \text{ hPa}$

Ereignisanzahl N	$\text{delta-}p \leq S_p$	$\text{delta-}p > S_p$	Summe
$E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$	3	14	17
$E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$	100	3	103
Total	103	17	120

Aus der Minimierung der Wahrscheinlichkeiten für *Bereich I* und *Bereich III* folgt automatisch die gewünschte Maximierung für den *Bereich II* und *Bereich IV*, siehe Tabelle 7. Mit den Gleichungen (2) und (3) ergibt sich aus der Tabelle 6 die aufgrund der endlichen Stichprobe approximierte Wahrscheinlichkeit P für die Bereiche in Tabelle 7.

Tabelle 7 Beispiel für die approximierte Wahrscheinlichkeit P für den Schwellenwert $S_p = 75 \text{ hPa}$

Wahrscheinlichkeit P	$\text{delta-}p \leq S_p$	$\text{delta-}p > S_p$
$E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$	$P\{A \mid B\} = 0,029$	$1 - P\{C \mid D\} = 0,824$
$E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$	$1 - P\{A \mid B\} = 0,971$	$P\{C \mid D\} = 0,176$
Summe	1	1

Abb. 12 zeigt den Verlauf der beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{A|B\}$ und $P\{C|D\}$ für ansteigende Schwellenwerte S_p im Bereich von 15 bis 130 hPa. Daraus wird ersichtlich, dass das Optimum für den gesuchten Schwellenwert bei einem Delta-p-Wert zwischen 75 und 85 hPa zu suchen ist; hier liegt die "Fehlerwahrscheinlichkeit" für eine Anlagenbeurteilung nach der Differenzdruckmessung ($P\{A|B\}$) noch auf einem relativ geringen Niveau, während die Wahrscheinlichkeit für eine unberechtigte gravimetrische Auswertung der Staubhülse ebenfalls noch relativ niedrig ist. Das lässt sich anhand des Beispiels der in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellten Werte erläutern; zumal der dafür gewählte Schwellenwert ($S_p = 75$ hPa) ebenfalls in dem genannten Optimum lag. Die Wahrscheinlichkeit $P\{A|B\}$ liegt hier bei 0,029, das heißt, dass ca. 97 % aller unterhalb des Staubgrenzwertes liegenden Messwerte auch tatsächlich als "staubsicherer" erkannt werden. Von den verbleibenden 2,9%, die mit der Delta-p-Methode nicht erkannt würden, liegen 2 % (2 Messungen) nur knapp oberhalb des zulässigen Staubgrenzwertes S_E von 150 mg/Nm^3

Die Wahrscheinlichkeit $P\{C|D\}$ von 0,176 bedeutet gleichzeitig, dass nur ca. 17,6 % der über das Delta-p-Verfahren beanstandeten Messwerte "unnötigerweise" gravimetrisch überprüft werden, oder – anders herum betrachtet – dass 82,4 % der beanstandeten Messwerte auch tatsächlich über dem Grenzwert von 150 mg/Nm^3 liegen.

Bemerkenswert ist das in Abb. 12 dargestellte flache Einlaufen der $P\{A|B\}$ -Funktion in das lokale Minimum vor der Markierung des Optimumbereiches. Auch die Funktion $P\{C|D\}$ erreicht im Bereich 75-85 hPa das lokale Minimum in einen flachen Kurvenabschnitt. Dieses charakteristische flache Erreichen des optimalen Minimums deutet auf eine sehr robuste und stabile Abhängigkeit vom Differenzdruck-Schwellenwert S_p hin und unterstreicht die praktische Anwendbarkeit der Delta-p-Methode.

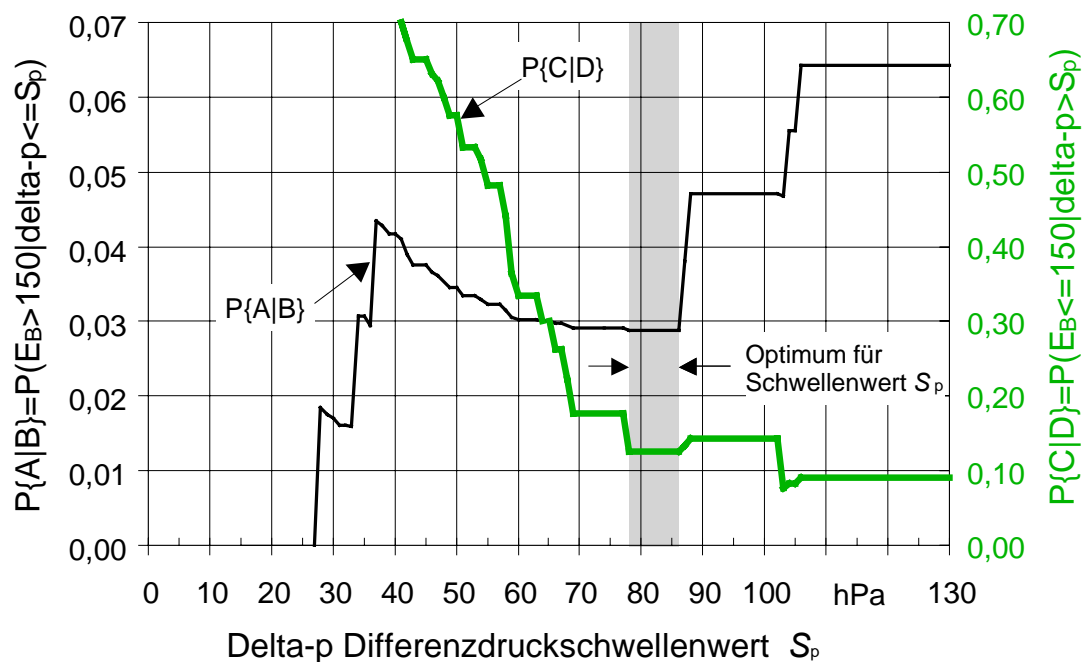


Abb. 12 Wahrscheinlichkeiten $P\{A|B\}$ und $P\{C|D\}$ in Abhängigkeit vom Differenzdruck-Schwellenwert S_p

Bei der Beurteilung der Datenbasis für die hier vorgestellte Schwellenwertempfehlung ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der (gravimetrisch gemessenen) Staub-Grenzwertüberschreitungen in der durchgeführten Versuchsserie deutlich geringer war, als in der betrieblichen Praxis des Kaminkehrerhandwerks. Dort wurden beispielsweise in Bayern bei den wiederkehrenden Messungen an automatisch beschickten Feuerungen 25 % der Anlagen wegen Staubwertüberschreitung beanstandet (Basis: 1999). In der vorliegenden Untersuchung lag die Beanstandungsquote jedoch lediglich bei 17 % (nur Staub). Durch diese ungleiche Beanstandungsquote kann es zu einer leichten Überbewertung des als staubsicher erkannten Anlagenanteils kommen. Weitere Unsicherheit ist dadurch gegeben, dass die Grenzwertüberschreitungen in den Versuchen häufig mit untypischen Brennstoffen hervorgerufen worden waren; in 9 von 22 Überschreitungs-fällen (41 %) handelte es sich um landwirtschaftliche Brennstoffe (Triticalekörner, Getreide-Ganzpflanze, Gerstenstroh), deren Ascheeigenschaften sich deutlich von Holzaschen unterscheiden. Inwieweit sich daraus jedoch Auswirkungen für die Filterbelastung bzw. für den gemessenen Differenzdruck ergeben haben könnten, ist unklar.

5.3 Vergleich der Staub- und CO- und O₂-Messverfahren

Aufgrund parallel erfasster Messwerte mit verschiedenen Messverfahren erlaubt das erarbeitete Datenmaterial auch einige zusätzliche Auswertungen zur Übereinstimmung dieser Messmethoden. Diese Auswertungen werden nachfolgend zusammengestellt.

Die Staubmesswerte, die nach der Kaminkehrermethode zustande kamen (hier: eigene Auswertung) weichen in der Regel von den Messungen nach VDI-Richtlinie 2066 ab. Das zeigt sich an der in Abb. 13 dargestellten Korrelation, in der die Steigung der Geraden mit 0,867 niedriger ist als der Idealwert 1; gleichzeitig ist der Schnittpunkt mit der Y-Achse negativ (-2,8). Im vorliegenden Fall bedeutet dies beispielsweise, dass bei einer Staubemission um 100 mg/Nm³ mit dem Kaminkehrerverfahren durchschnittlich nur ein Wert von ca. 84 % der nach VDI 2066 gemessenen Staubkonzentration gemessen wird, bzw. dass die VDI-2066-Messwerte um ca. 19 % über den Kaminkehrermessungen liegen.

Die Ursachen für diese Messwertabweichungen sind sowohl in der Messmethode als auch in den unterschiedlichen Messfühlerpositionen (Abb. 3) zu suchen. Bei der Messmethode fällt vor allem auf, dass die Gasaufbereitung des abgesaugten Probengases verschieden war. Während die abgesaugte Probengasmenge bei der VDI-Methode "heißes Abgas" im heißen Zustand durch den (außenliegenden) Filter geleitet wurde (wobei die im Abgas gemessene mittlere Temperatur von 237 °C auch hier durch Abkühlung reduziert wird), findet bei der Kaminkehrermethode eine gezielte Temperierung (d. h. Kühlung bzw. Heizung auf 70 °C) statt (vgl. Kapitel 3.2). Erst wenn eine solche Temperierung auch für die VDI-Methode eingeführt wird (hier: Messvariante "VDI 2066-gekühlt") gleichen sich die dadurch verursachten Messunterschiede wieder aus. Das wird anhand von Abb. 14 ersichtlich; darin wird für die Steigung der Regressionsfunktion nahezu der Idealwert von 1,0 erreicht; gleichzeitig liegt der Y-Achsenabschnitt nahe null.

Folgerichtig weicht auch die Geradensteigung der Korrelation zwischen den beiden Messwerten nach VDI-Methode ("heißes bzw. gekühltes Abgas") deutlich von der Ideallinie (Steigung 1,0) ab (Abb. 15). Aufgrund der Temperaturunterschiede im Filterbereich

verhalten sich die Messwerte zueinander ähnlich wie bei der in Abb. 13 dargestellten Korrelation, in der ebenfalls Messungen mit unterschiedlichen Abgastemperaturen im Filterbereich dargestellt werden.

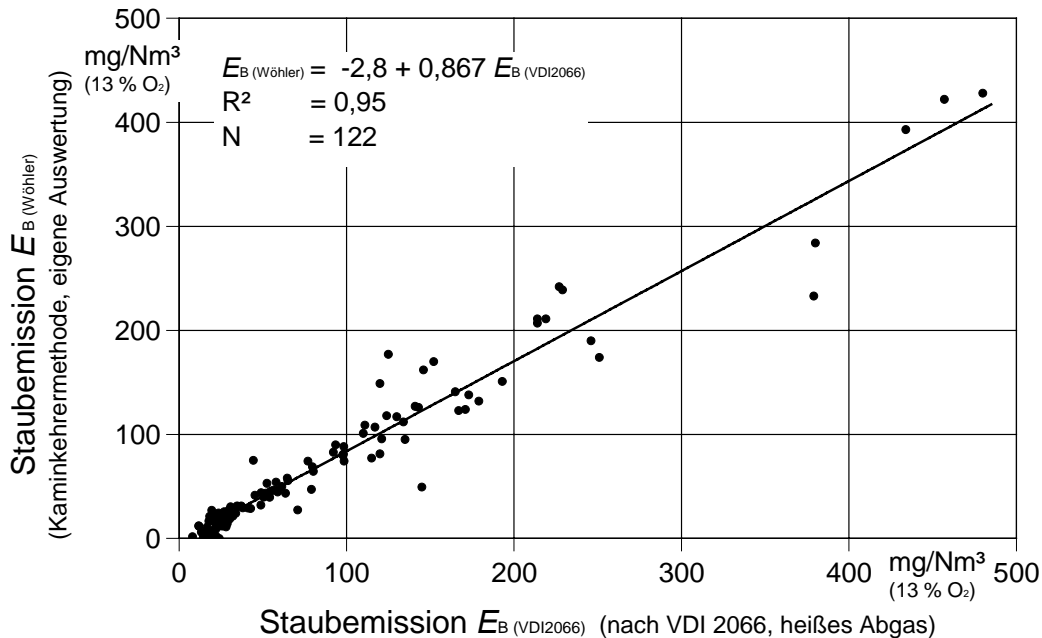


Abb. 13 Korrelation der Staubmessung nach VDI 2066 (heißes Abgas) mit Messungen nach Kaminkehrermethode (jeweils 15-Minuten-Werte, nur Werte bis max. 500 mg/Nm^3). O_2 -Bezug nach Messwerten mit Kaminkehrergerät bzw. mit Prüfstands-ausrüstung (Paramagnetismus). (Zu den Messsondenpositionen siehe Abb. 3)

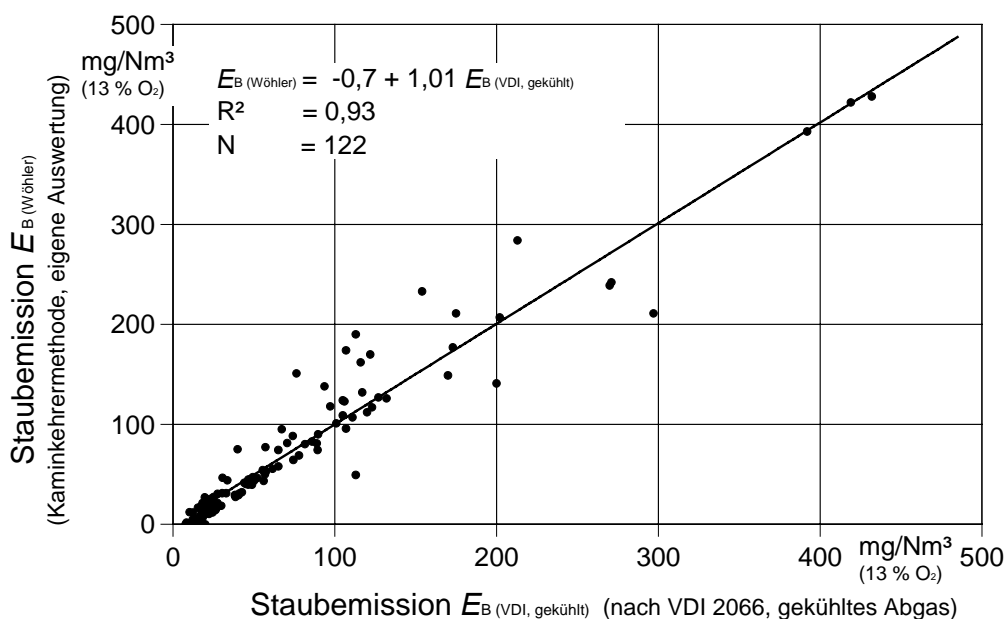


Abb. 14 Korrelation der Staubmessung nach VDI 2066 (hier: gekühltes Abgas) mit Messungen nach Kaminkehrermethode (LTW-Auswertung), (jeweils 15-Minuten-Werte, nur Werte bis max. 500 mg/Nm^3). O_2 -Bezug nach Messwerten mit Kaminkehrergerät bzw. mit Prüfstands-ausrüstung (Paramagnetismus). (Zu den Messsondenpositionen s. Abb. 3)

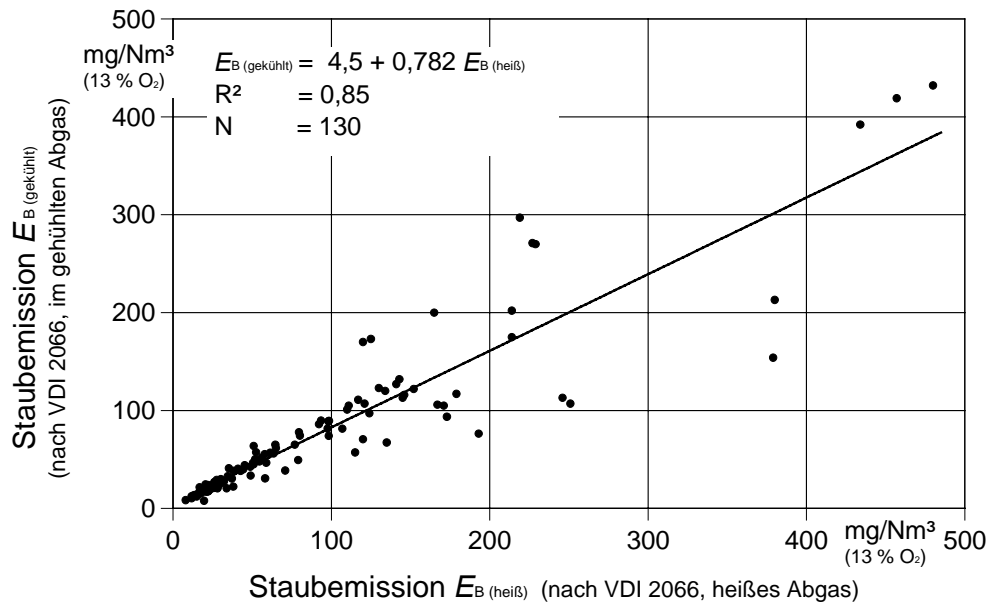


Abb. 15 Korrelation der Staubmessung nach VDI 2066 (heißes Abgas) mit Messungen bei gekühltem Probgas (70°C) (jeweils 15-Minuten-Werte, nur Werte bis max. 500 mg/Nm³). (Zu den Mess-Sondenpositionen siehe Abb. 3)

In der Vergangenheit wurde die Bedeutung der isokinetischen Probenahme und deren Einfluss auf die Staubmasse häufig diskutiert. Die Abb. 14 dargestellten Ergebnisse zeigen hier deutlich, dass die Einführung des vereinfachten nicht-isokinetischen Kaminkehrerverfahren im Praxiseinsatz der Emissionsüberwachung berechtigt war. Bei diesem vereinfachten Verfahren geht man von einer konstanten Rauchgastemperatur von 325 °C und einer Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s aus. Obwohl in diesem Versuch die mittlere Abgastemperatur 237 °C beträgt, sind die Abweichungen zwischen der Staubemission $E_{B(\text{Wöhler})}$ und $E_{B(\text{VDI, gekühlt})}$ sehr gering.

Ein Teil der in den Korrelationen abzulesenden Streuungen können allerdings auch auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass bei den Messungen zum Teil unterschiedliche Verfahren für die Bestimmung des Restsauerstoffs (O₂) im Abgas verwendet wurden. Dadurch kommen z. T. abweichende Berechnungswerte für die Emissionen im Normzustand des Abgases zustande. Die Übereinstimmung der O₂-Messwerte wird in Abb. 16 dargestellt. Demnach kommt es vor allem im höheren und im niedrigen O₂-Konzentrationsbereich zu nennenswerten Abweichungen.

Die Auswirkungen dieser Streuungsursache auf den Messverfahrensvergleich bleibt jedoch insgesamt gering. Das zeigt eine zusätzliche Auswertung, in der ein einheitlicher O₂-Messbezug gewählt wurde (in diesem Fall: O₂-Messung nach Kaminkehrerverfahren). Die Ergebnisse dieser Regressionsanalyse (Gleichung (6)) weichen nur gering von den in Abb. 13 dargestellten Messergebnissen ab.

$$E_{B(\text{Wöhler})} = -3,0 + 0,837 E_{B(\text{VDI2066-heiß})} \quad (R^2 = 0,95) \quad (6)$$

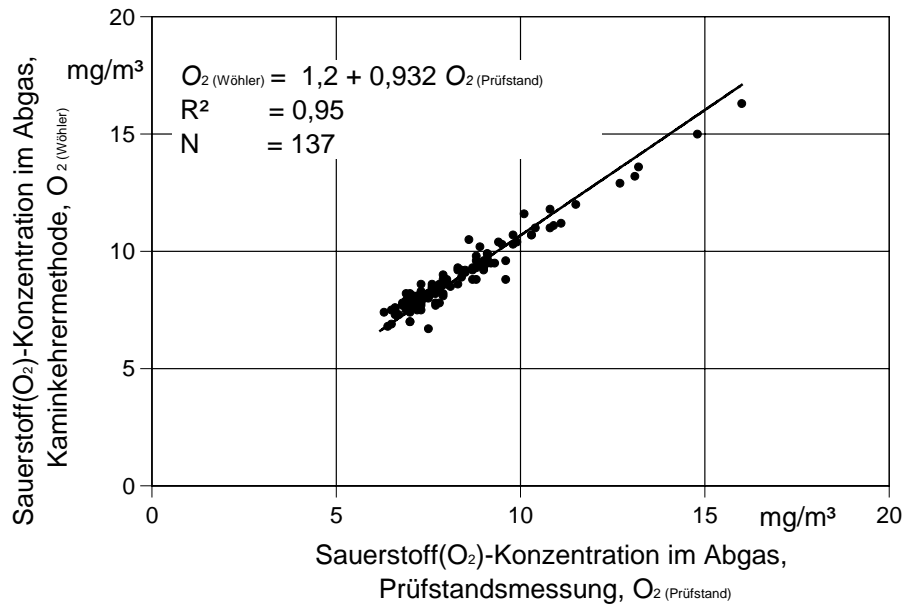


Abb. 16 Korrelation der Sauerstoff(O_2)-Messwerte nach Kaminkehrermethode (elektrochemischer Sensor) sowie mit verwendeter Prüfstands-Messausrüstung (Paramagnetismus) (jeweils 15-Minuten-Werte, nur Werte bis max. 500 mg/Nm³). Zu den Messsondenpositionen siehe Abb. 3

Beim Vergleich der beiden unterschiedlichen Kohlenmonoxid(CO)-Messverfahren ergeben sich keine auffälligen Messwertunterschiede. Obwohl die Probenahme an unterschiedlichen Positionen im Abgasrohr erfolgte und es sich um physikalisch grundsätzlich

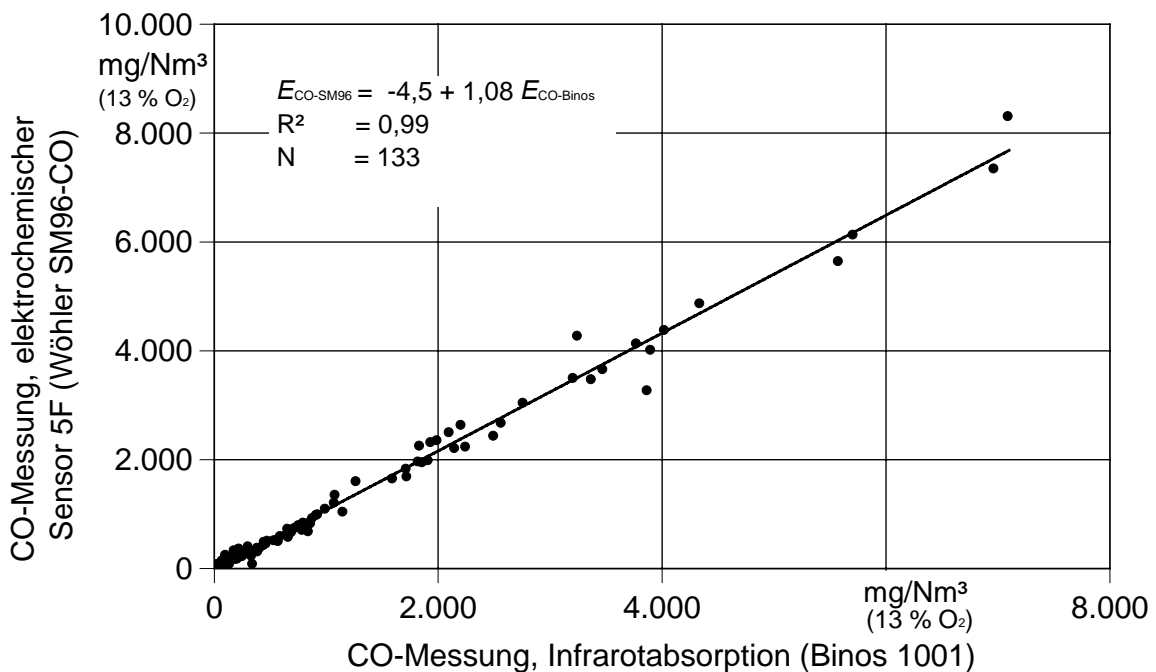


Abb. 17 Korrelation der Kohlenmonoxidmesswerte (CO) aus Messungen mit Kaminkehrermessgerät (elektrochemischer Sensor) bzw. BINOS 1001 (Infrarotabsorption). Werte oberhalb 8 000 mg (BINOS) aufgrund starker Streuung nicht berücksichtigt

verschiedene Messverfahren handelte, weisen die jeweiligen Wertepaare eine sehr gute Korrelation auf (Abb. 17). Hierbei ist vor allem zu berücksichtigen, dass nicht nur die CO-Messverfahren verschieden waren (Infrarotabsorptionsmethode bzw. elektrochemischer Sensor). Auch für die Restsauerstoffbestimmung, die für die spätere Umrechnung der CO-Abgaskonzentration auf eine einheitliche Sauerstoffbezugskonzentration erforderlich ist, kommen unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz (Paramagnetismus bzw. elektrochemischer Sensor für Kaminkehrermethode, vgl. hierzu auch Abb. 16).

Da elektrochemische CO-Sensoren prinzipiell eine Querempfindlichkeit gegenüber Wasserstoff im Messgas besitzen, werden bei Ihnen in der Regel besondere Anforderungen an die Messwertkompensation gestellt. Wasserstoffanteile, die besonders im Luftmangel entstehen und bei Holz im Anteilsverhältnis H_2/CO von ca. 3/10 auftreten können, führen generell zu einer Erhöhung des Ausgangssignals einer elektrochemischen Messzelle. Ein aufwendiges Infrarotabsorptionsverfahren (hier: BINOS 1001) ist dagegen prinzipiell unempfindlich gegenüber H_2 -Anteilen im Abgas. Die Messwertkorrelation in Abb. 17 zeigt jedoch, dass heutige Messgeräte mit elektrochemischen CO-Sensoren auch bis in relativ hohe CO-Bereiche mit Strahlungsabsorptionsmethoden vergleichbar sein können.

5.4 Einfluss des Aschegehaltes

Für die Wirkung des Aschegehaltes auf den Staubausstoß wurde – zumindestens für Holzhackschnitzel verschiedener Herkunft und Qualität sowie für und Holzpellets – ein deutlicher Zusammenhang festgestellt (Abb. 18). Demnach ist die Einhaltung des Staubgrenzwertes von 150 mg/Nm^3 generell auch dann ohne sekundäre Entstaubungseinrichtung möglich, wenn es sich um sehr aschereiche Holzbrennstoffe wie die hier verwendete

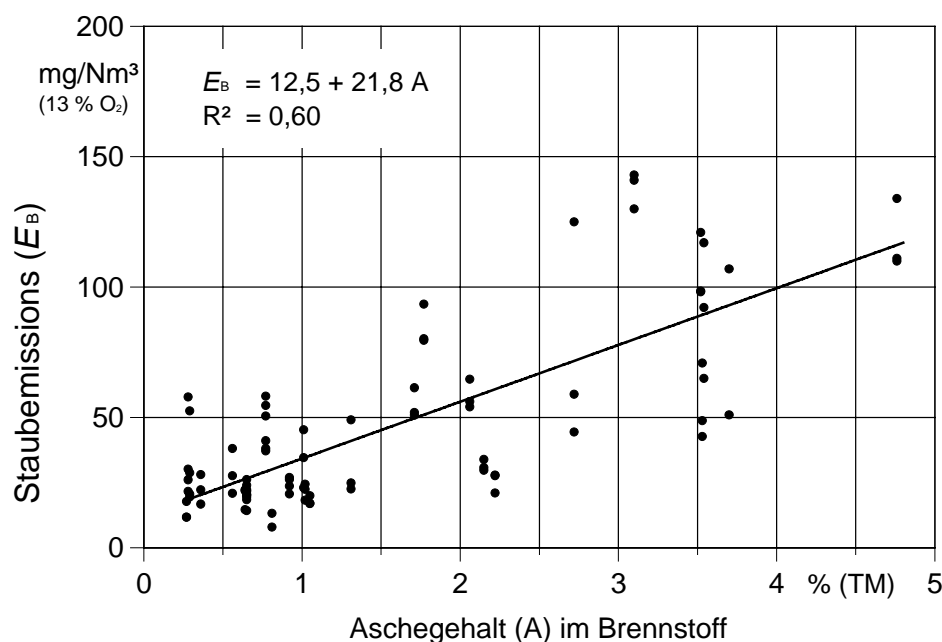


Abb. 18 Aschegehaltseinfluss auf die Staubemission beim Einsatz von Holzbrennstoffen (hier: nur Hackschnitzel und Holzpellets) in der untersuchten 50-kW-Hackschnitzel-feuerung (Heizomat HSK-RA-50). Staubmessungen nach VDI 2066 (heißes Abgas)

te Pappel (1,7 bis 3,1 % Asche), Weide (3,5 % Asche) oder Straßenbegleitholz (3,5 bis 4,8 % Asche) handelt.

Probleme treten dagegen vor allem bei Halmgutbrennstoffen und Getreidekörnern auf; hier lassen sich erhöhte Staubemissionen offenbar kaum vermeiden, obgleich deren Aschegehalt ebenfalls innerhalb der genannten Bandbreite lag (z. B. Gerstenstroh 5,6 %, Miscanthus 4,1 %, Triticalekörner 2,2 %).

Auffällig günstige Staubmessungen ergaben sich dagegen bei Rindenbrennstoffen, obgleich diese Brennstoffe mit ca. 2,2 (Kiefernrinde) bis 8,2 % i.d.TM (Fichtenrinde) zum Teil zu den besonders aschereichen Brennstoffen zählen. Als Ursache für die Staubemissionsunterschiede zwischen den Brennstoffen spielt möglicherweise die Beschaffenheit der während der Verbrennung gebildeten Aschen eine Rolle (Dichte, Oberfläche). Weiterführende Aussagen hierzu sind anhand des vorliegenden Datenmaterials jedoch nicht möglich.

6 Zusammenfassung

In wiederkehrenden Staubmessungen an automatisch beschickten Biomassefeuerungen wird üblicherweise die in einem Filter abgeschiedene Staubmenge eines Teil-Abgasstroms gravimetrisch bestimmt. Eine Beurteilung der "Staubsicherheit" einer Anlage durch den Kaminkehrer oder durch den Kundendienst ist wegen der dabei erforderlichen Präzisionswägung nicht unmittelbar vor Ort möglich sondern erfolgt mit einem zeitlichen Verzug von zum Teil mehreren Wochen.

Ein neuartiges Messverfahren (Differenzdruckverfahren) könnte hier Abhilfe schaffen und zu einer Beschleunigung sowie eventuell zu einer Verbilligung der Überprüfung führen. Bei diesem Verfahren wird der mit zunehmender Filterverschmutzung beobachtete Anstieg des Differenzdrucks über dem Filter einer Staubbmesssonde gemessen ("Delta-p-Methode"). Die in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 15 Minuten) gemessene Druckdifferenz kann auf eine mögliche Überschreitung der Emissionsbegrenzung für Staub hinweisen. Für die vorliegende Untersuchung wurde ein Messgeräte-Prototyp von der Firma Wöhler (Bad Wünnenberg) entwickelt und bereitgestellt.

In einem Versuchsprogramm wurde die Datenbasis für eine Beurteilung des Differenzdruckverfahrens und für einen weitergehenden Methodenvergleich für die Staub- und Kohlenmonoxid(CO)-Bestimmung im Abgas erarbeitet. Hierzu wurden insgesamt 138 Parallelmessungen mit unterschiedlichen trockenen und feuchten, aschearmen und aschereichen sowie groben, fein-zerkleinerten oder pelletierten Biomasse-Brennstoffen durchgeführt (Buche, Fichte, Pappel, Weide, Straßenholzschnitt, Fichten- und Kiefernrinde, Schwartenholz, Säge- und Hobelspäne, Gerstenstroh, Triticale-Ganzpflanzen, Miscanthus, Triticalekörner, Rapspresskuchen).

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem gemessenen Differenzdruck und der gravimetrischen Staubmessung. Um aus dem Datenmaterial einen geeigneten Differenzdruck-Schwellenwert zur Erkennung "staubsicherer" Feuerungen herauszulesen, wurde eine Analyse der Wahrscheinlichkeit einer Falschbeurteilung bei veränderlichen Schwellenwerten durchgeführt. Demnach liegt das Optimum für den Schwellenwert zwischen 75 und 85 hPa. In diesem Bereich werden ca. 97 % aller unterhalb des Staubgrenzwertes liegenden Messwerte auch tatsächlich als "staubsicherer" erkannt, während nur ca. 17,6 % der über das Delta-p-Verfahren beanstandeten Messwerte "unnötigerweise" gravimetrisch überprüft werden müssen – oder anders herum betrachtet: 82,4 % der beanstandeten Messwerte liegen auch tatsächlich über dem Grenzwert von 150 mg/Nm³. Die vorliegende Datenbasis legt somit nahe, dass eine "Sofortbeanstandung" von Staubbmesswerten auch anhand des vor Ort ablesbaren Differenzdrucks (Delta-p-Messwert) erfolgen könnte, so dass nur noch ein geringer Teil der in der Praxis (im gleichen Gerät) verwendeten Filterhülsen zur gravimetrischen Auswertung eingeschickt werden müsste. Eine direkte Umrechnung der Differenzdruckmessung in eine tatsächliche äquivalente Massenbeladung, d. h. in einen Staubbmesswert, ist dage-

gen nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich; eine solche Zielsetzung wurde im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung auch nicht verfolgt.

Beim Vergleich der beiden eingesetzten gravimetrischen Staubbestimmungsverfahren zeigt sich, dass die Werte, die nach der Kaminkehrermethode zustande kamen in der Regel um ca. 15 % unter den nach VDI-Richtlinie 2066 gemessenen Staubwerten liegen. Zu einer besseren Messwertübereinstimmung kommt es erst, wenn – wie beim Kaminkehrerverfahren – auch bei den Messungen nach VDI-Richtlinie 2066 eine Abgastemperierung im Abscheidebereich auf 70 °C durchgeführt wird. Inwieweit diese Abgastemperierung jedoch die tatsächliche Staubbelastung im Abgas besser widerspiegelt, bleibt unklar.

Obwohl die mittlere Abgastemperatur im Versuch mit 237 °C deutlich von der vereinfachten Bedingung für das Kaminkehrerverfahren von 325 °C bei 4 m/s Abgasgeschwindigkeit abweicht, besitzt die beim Messverfahren nach VDI 2066 eingehaltene Isokinetik bei der Probenahme scheinbar keinen Einfluss.

7 Quellenverzeichnis

- /1/ DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel - Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- /2/ DIN EN 303-5, Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 1999; 28 S.
- /3/ DIN 51 718 (01/1978): Feste Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- /4/ DIN 51719 (1978): Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Deutsches Institut für Normung e.V. (eds), Berlin, Beuth Verlag, 4 S.
- /5/ DIN 51 900, Teil 3 (08/1977): Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes - Verfahren mit adiabatischem Mantel. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- /6/ Ester, S.: Interne Firmenunterlagen der Fa. Wöhler MGKG GmbH, Schützenstraße 38, D-33181 Bad Wünnenberg
- /7/ Feldhaus, G. Hansel, H.D. (Bearb.): Bundes-Immissionsschutzgesetz. 11. Auflage. Heidelberg, C.F. Müller Verlag, 1997, 646 S.
- /8/ Hartmann, H.; Schmid, V.; Link, H.: Untersuchungen zum Staubausstoß von Holz-zentralheizungsanlagen kleiner Leistung – Partikelgrößenverteilungen, Gesamtstaub und weitere Kenngrößen, Abschlussbericht (Teilbericht) für das Umweltbundesamt (UBA), Berlin, 73 S (noch unveröffentlicht)
- /9/ Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe "Materialien", Nr. 154
- /10/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe "Materialien", Nr. 156, 133 S.
- /11/ VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung – Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- /12/ VDI 2066, Blatt 3 Entwurf (04/1986): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- /13/ VDI 3481, Blatt 1 (08/1975): Messung gasförmiger Emissionen - Messen der Kohlenwasserstoff-Konzentration - Flammen-Ionisations-Detektor (FID). Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

Abschlussbericht II

Feldstudie zur vereinfachten Feststellung von Staub-Grenzwertüberschreitungen (Delta-p-Methode)

Dr. Hans Hartmann
Dipl.-Phys. Paul Roßmann
cand. agr. Thomas Decker

Technologie- und Förderzentrum - TFZ

Dr. Stephan Ester
Fa Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg

Herbert Wazula
Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV) und Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk (LIV-Bayern)

Dipl.-Ing. Gerhard Schmoeckel
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg

Dezember 2003

Inhaltsverzeichnis (Bericht II)

	<u>Seite:</u>
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	3
3 Methodisches Vorgehen	4
3.1 Beschreibung des Messverfahrens	4
3.2 Versuchsprogramm	6
3.3 Datenauswertung	6
3.4 Erfassung standortbezogener Daten mittels Fragebogen.....	9
4 Ergebnisse zum Delta-P-Messverfahren	11
4.1 Korrelation des Differenzdrucks mit gravimetrisch gemessenen Werten.....	11
4.2 Identifikation eines Schwellenwertes S_p für den Differenzdruck (Delta-p)	12
4.3 Korrelation zwischen CO und gemessenen Staubmesswerten	16
5 Ergebnisse der Befragung (Standortdaten)	19
5.1 Allgemeine Daten über den betrachteten Anlagenbestand.....	19
5.2 Zusammenhang zwischen Staub-Beanstandung und Anlagenmerkmalen.....	28
6 Zusammenfassung	38
7 Quellenverzeichnis	40

1 Einleitung

Überhöhte Staubemissionswerte stellen in der Praxis der kleineren Holzfeuerungsanlagen die häufigste Ursache für Beanstandungen durch den Kaminkehrer dar. Zudem kann diese Diagnose nicht schon unmittelbar vor Ort sondern oft erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung an den Betreiber mitgeteilt werden. Verzögerte Abhilfe – z.B. durch Reinigung oder Kundendiensteingriff – ist die Folge. Eine sofortige Feststellung der "Staubsicherheit" vor Ort ist also aus Sicht des Betreibers aber auch für den Kundendienst und den Kaminkehrer wünschenswert.

In einem vorangegangenen Projekt¹ war hierzu ein neuartiges Messverfahren (Differenzdruckverfahren "Delta-p") zur Bestimmung der Staubsicherheit im Rahmen der wiederkehrenden Messungen an automatisch beschickten Holzfeuerungen untersucht worden. Bei diesem Verfahren wird der mit zunehmender Filterverschmutzung beobachtete Anstieg des Differenzdrucks über dem Filter einer konventionellen Staubmesssonde während des üblichen Probenahmezeitraumes von 15 Minuten bestimmt. Anhand der gemessenen Druckdifferenz soll bereits vor der Rückwaage der beladenen Filterhülse auf eine mögliche Überschreitung der Emissionsbegrenzung für Staub geschlossen werden (Abb. 1).

Im Ergebnis der genannten Untersuchung war festgestellt worden, dass dieses Verfahren auch eine emissionsorientierte Anlageneinstellung ermöglicht und damit in der Praxis zu einer Verbesserung des Emissionsverhaltens, einer Verringerung der Beanstandungsquote und somit zu einer Kosteneinsparung durch weniger Nachmessungen führen könnte. Unter Prüfstandsbedingungen hatte sich gezeigt, dass eine relativ hohe Treffsicherheit bei der Identifikation von Anlagen, die den Staubgrenzwert unterschreiten, möglich ist, so dass lediglich für die mit der Schnellbestimmungsmethode nicht als staubsicher erkannten Anlagen eine Überprüfung nach der konventionellen gravimetrischen Messmethode erforderlich wäre (Abb. 1). Außerdem bietet sich die Möglichkeit einer verbesserten Qualitätssicherung der Staubmessung, da die Aufzeichnung des Differenzdrucks auch eine rechtzeitige Fehler-Erkennung erlaubt (z. B. bei Undichtigkeiten der Gasabsaugung, beschädigte, geplatzt oder abgerutschte Staubfilterhülsen, etc).

Für eine Beurteilung des Verfahrens in der Praxis reichte aber die vorliegende Datenbasis, die auf einem Feuerungsprüfstand der ehemaligen Landtechnik Weihenstephan (heute: TFZ) an nur einer Anlage erarbeitet wurde, nicht aus. Hierfür war eine Feldstudie erforderlich, in der sowohl die Praxis der Staubemissionsmessung durch den Kaminkehrer als auch der vorhandene Anlagenbestand möglichst repräsentativ abgebildet wird.

¹ Projekt: "Senkung des Messaufwandes bei der Ermittlung der Staubemissionen aus Holz-Kleinfeuerungsanlagen" (2001) /3/

Idee „ Δp -Verfahren“ $\Delta p = p(t_{p_{\max}}) - p(t_{\text{Start}})$

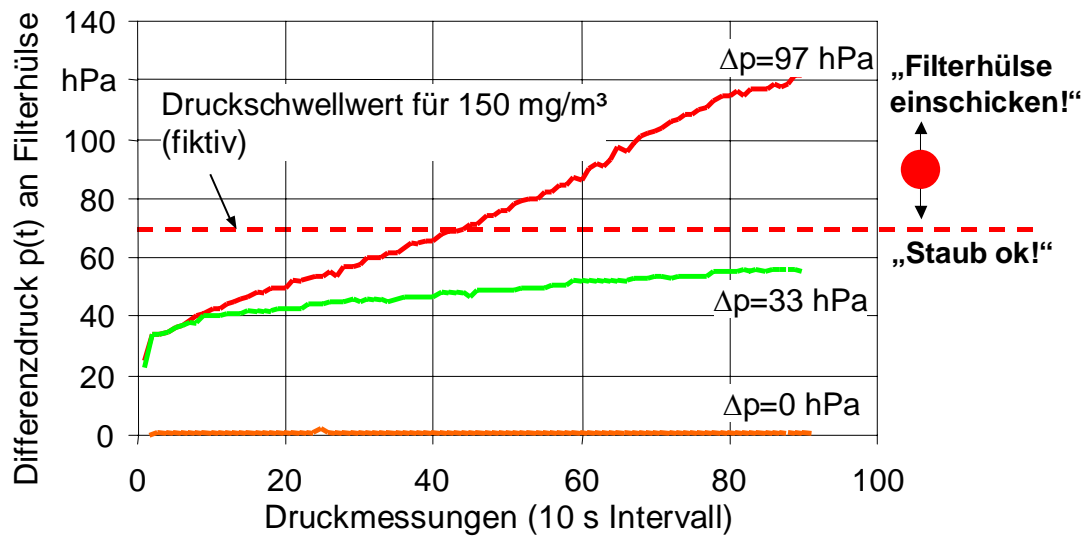


Abb. 1 Darstellung der prinzipiellen Überlegungen für die Anwendung des Delta-p-Verfahrens zur Staubfeststellung

2 Zielsetzung

Ziel der durchgeführten Arbeiten war es, eine zuverlässigere Beurteilung der neu entwickelten Differenzdruck-Messmethode zur Bestimmung der Staubsicherheit von messpflichtigen Biomassefeuerungen (Erstmessungen bei handbeschickten Stückholzkesseln oder wiederkehrende Messungen an automatisch beschickten Feuerungen) zu ermöglichen. In einer Feldstudie sollte festgestellt werden, inwieweit sich die bisherigen positiven Messergebnisse, die unter standardisierten, d. h. weitgehend reproduzierbaren Messbedingungen zustande gekommen waren, auch in der messtechnischen Praxis im Rahmen von realen Überprüfungsmessungen wiederholen lassen.

Die Ziele der Arbeiten sind wie folgt:

- Schaffung einer erweiterten Datenbasis zur Beurteilung der Eignung der Delta-p-Methode für die Erkennung von staubsicheren Anlagen
- Erprobung der Funktionssicherheit der Messmethode
- Identifikation eines geeigneten Schwellenwertes für den gemessenen Differenzdruck (Delta-p-Wert)
- Identifikation von Ursachen für Staubgrenzwertüberschreitungen durch Erhebung und Auswertung von anlagen- und betriebsbezogenen Daten zum Anlagenbestand in der Praxis

Nicht das Ziel des Vorhabens war es, eine Methode zu entwickeln und zu erproben, mit der der gemessene Differenzdruck in einen realen Staubemissionswert umgerechnet werden kann. Die Methode soll vielmehr eine Ergänzung zur parallel stattfindenden gravimetrischen Staubbestimmung darstellen, wobei eine Einsendung der Filterhülse für die spätere Rückwaage im Zentrallabor des ZIV (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband) nur dann erforderlich wäre, wenn dies durch einen kritischen Differenzdruck angezeigt würde.

3 Methodisches Vorgehen

3.1 Beschreibung des Messverfahrens

Für die Bestimmung des Differenzdrucks ist ein konventionelles Kaminkehrer-Messgerät für Staub erforderlich (Abb. 2), welches lediglich mit einer Zusatzfunktion ausgestattet werden muss. Dazu wird eine herkömmliche Aufnahmehalterung einer Glasfaser-Filterhülse zusätzlich mit einer Druckmesseinrichtung ausgestattet, die den Differenzdruck an der Filterhülse während der konventionellen Probenahme erfasst (siehe Abb. 3). Der konstante Abgasteilmassenstrom von 9 NL/min wird dabei vom Staubmessgerät überwacht und geregelt. Das Differenzdruckmessgerät DPS2002 stellt somit eine funktionale Erweiterung der beheizten Sonde für die eignungsgeprüften Staubmessgeräte SM78, SM96 und SM96-CO der Firma Wöhler dar. Da die übrigen Komponenten des Messverfahrens ansonsten gleich bleiben, können prinzipiell auch andere Fabrikate mit der genannten Zusatzfunktion nachgerüstet werden.



Abb. 2 Handelsübliches Messgerät zur Überprüfung der Staub- und CO-Emissionen nach 1. BImSchV (Wöhler SM 96-CO)

Die Differenzdruckmessung erfolgt mit einem Handmessgerät, welches zugleich zur Aufbereitung und Speicherung von insgesamt 90 Differenzdruckwerten dient, die in 10-Sekunden-Intervallen aufgezeichnet werden (ausreichend für eine Messdauer von insgesamt 15 min). Das Anzeigegerät erkennt den Start der Staubmessung automatisch am Überschreiten eines Auslöserwertes, der angepasst werden kann. Diese "Triggereinstellung" wurde mit 5 hPa festgelegt. Die Abfolge der 90 Messwerte wird sowohl am Display angezeigt – und ermöglicht so eine unmittelbare Kontrolle der Beladung der Hülse – als auch in ein internes Datenspeichermodul übertragen und abgespeichert. Auf diese Wei-

se können bis zu 250 Druckverläufe à 90 Einzelwerte erfasst werden, bevor eine Weitergabe an einen PC erforderlich wird. Um für den Feldversuch eine erhöhte Datensicherheit zu erreichen, wurden die Druckmessdaten jedes Messdatensatzes zusätzlich über einen mobilen Thermodrucker ausgedruckt und zusammen mit dem Datenerfassungsbogen aufbewahrt.

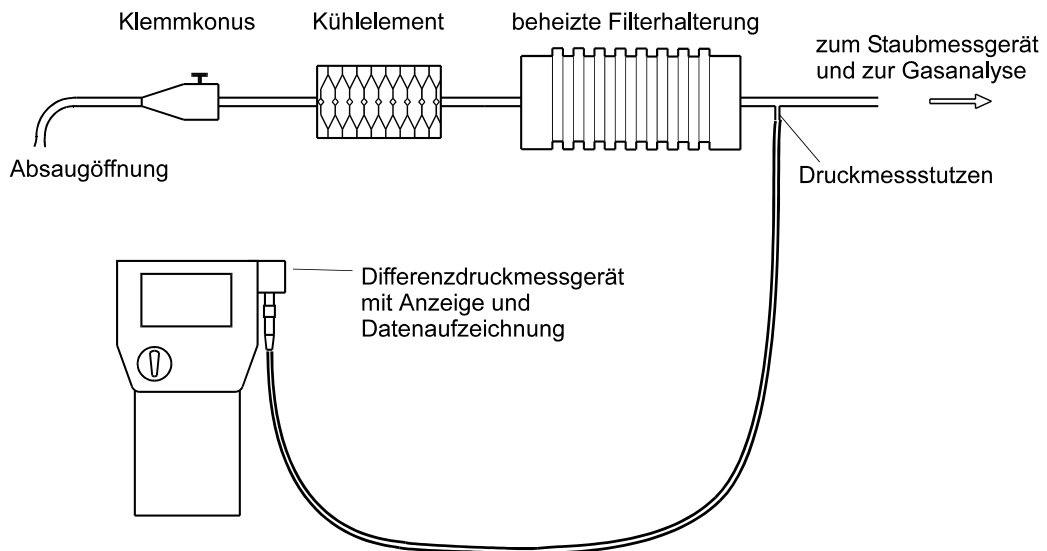


Abb. 3 Messgerät DPS-2002 für die Bestimmung des Differenzdrucks bei der Staubmessung, messtechnisches Prinzip (oben) und Realisierung (unten) durch technische Erweiterung an einem konventionellen Messgerät für Staubmessungen nach 1.BImSchV (Hersteller: Fa. Wöhler MGKG GmbH, Bad Wünnenberg) (nach /1/)

3.2 Versuchsprogramm

Kaminkehrerschulungen. Vor Beginn der Messungen wurden die beteiligten Kaminkehrer mit der Funktionsweise und der Bedienung des erweiterten Staubmessgerätes sowie mit den Zielen des Projektes vertraut gemacht. Hierzu wurde im Innungshaus der Kaminkehrerinnung Niederbayern in Rimbach eine eintägige Schulung durchgeführt. Die Schulung wurde von den Projektpartnern Fa. Wöhler (Dr. Ester) und ZIV (Herr Wazula) durchgeführt. Als Arbeitsunterlage diente dabei unter anderem die im Bedienungsanleitung zum Delta-p-Messgerät DPS 2002.

Während der Schulung wurden außerdem die Struktur und die Ziele des vom Kaminkehrer zu jeder gemessenen Anlage auszufüllenden Fragebogens erläutert (siehe Kapitel 3.4).

Durchführung der Feldversuchsmessungen. Die Messungen wurden in der Heizperiode 2002/2003 durchgeführt. Insgesamt waren 28 Kaminkehrer an der Untersuchung beteiligt. Dabei wurden sämtliche in den jeweiligen Kehrbezirken anfallende Messungen an Holzfeuerungen ohne weitere Auswahl berücksichtigt, das heißt, dass sowohl wiederkehrende Messungen an automatisch beschickten Holzfeuerungen ab 15 kW (einschließlich Pelletkessel) als auch Erstmessungen an handbeschickten Holzfeuerungen ab 15 kW zur Auswertung kamen. Hieran fand jeweils eine einzige gültige Messung statt. Insgesamt ergibt sich folgende Verteilung auf die beiden Bauartengruppen:

handbeschickten Anlagen: 78 (= 20 %)
automatisch beschickte Anlagen: 319 (= 80 %).

Ebenso zufällig ergab sich die Verteilung der in den gemessenen Anlagen verwendeten Brennstoffe. Diese und weitere Informationen zu den Messstandorten wurden im Rahmen einer Fragebogenaktion erfasst (Kapitel 3.4); sie werden in einem separaten Ergebnisteil ausgewertet und dargestellt (Kapitel 4.3).

Aus organisatorischen Gründen wurden zwei Regionen mit hoher Holzfeuerungsichte ausgewählt, Niederbayern und Unterfranken. Dadurch konnte die Anzahl der zu beteiligenden und zu schulenden Kaminkehrer auf ein sinnvolles Maß begrenzt werden. Dennoch waren insgesamt 28 Kehrbezirke und somit auch durchführende Personen an den Messungen beteiligt.

Durch die Wahl der verschiedenen Regionen wurde auch eine angemessene Diversität beim betrachteten Anlagenbestand aber auch bei den eingesetzten Brennstoffen gewährleistet (z. B. Nadelholz- und Laubholzregion). Die weitaus überwiegende Zahl der Anlagen wurde in der Region Niederbayern (überwiegend Nadelholz) untersucht.

3.3 Datenauswertung

Die in den Datenaufzeichnungsmodulen gespeicherten Differenzdruckmessungen der Kaminkehrer wurden mit einem PC ausgelesen und mit Hilfe eines Makros in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen. Zu jeder Differenzdruckmessung wurde anschließend eine Grafik über den Verlauf der Druckwerte über die 15-minütige Messdauer erstellt. In Abb. 4 sind zwei Beispiele für einen solchen Differenzdruckverlauf dargestellt. In

der überwiegenden Anzahl der Messungen wurde ein kontinuierlicher Messdatenverlauf beobachtet, bei dem das jeweilige Maximum am Ende der Aufzeichnungsdauer lag (Abb. 4, oben). In einigen Fällen kam es aber auch zu einem Maximum, das deutlich vor dem Ende der Messung lag (Abb. 4, unten). Ein derartiges Abklingverhalten des Druckverlaufs deutet auf ein Aussetzen der Staubbeladung, das heißt auf einen stark schwankenden Staubausstoß hin. Bei einer fortgesetzten Gasabsaugung nach einem Abfall der Staubbelastung kommt es offenbar zu einer Wandlung der Staubhülle vom Oberflächen- zum Tiefenfilter. Durch die erzwungene Strömung werden die Ruß- oder Staubpartikel mit der Zeit von der Oberfläche in tiefere Filterbereiche eingezogen und "verdünnen" sich dort im Gewebe.

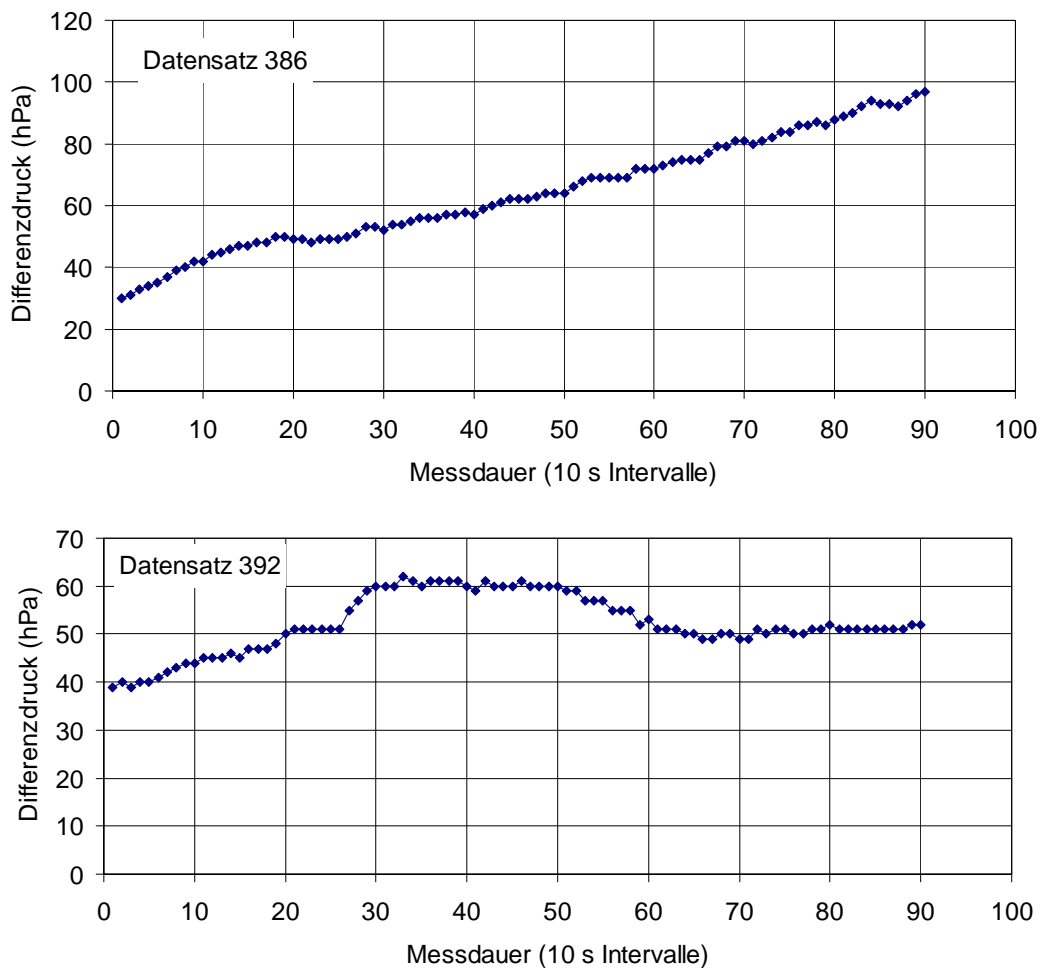


Abb. 4 Beispiele für den Verlauf des Differenzdrucks über die Messdauer. Oben: Typischer Verlauf, unten: Verlauf mit Druckmaximum vor dem Messende

Diese Vermutungen wurden durch einen Laborversuch bei der Firma Wöhler bestätigt. Hierzu wurde eine Testabsaugung von Abgasen einer Petroleumlampe als Partikelgenerator während der Dauer von drei Minuten durchgeführt (Abb. 5). In dieser Zeit kam es zu einem ansteigenden Druckverlauf. Bei Erreichen von ca. 150 hPa wurde die Petroleumlampe abgeschaltet, während die Probenahme aber weiterlief. Der Differenzdruck sank danach im Laufe der weiteren Registrierung um ca. 25 hPa reproduzierbar ab.

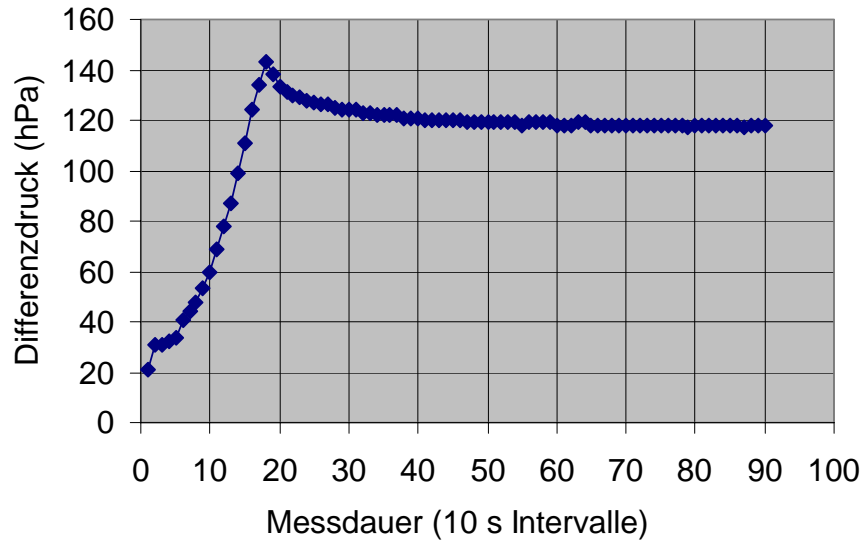


Abb. 5 Differenzdruckverlauf im Laborversuch mit Petroleumlampe als Partikelquelle

Bei der Auswertung der Druckverläufe wurde die Differenz zwischen dem Anfangs- und dem Maximaldruck bestimmt. Da in einigen Fällen der allererste Messwert nach Überschreiten der Triggerschwelle von 5 hPa bei noch nicht eingeschwungenem Absaugpumpenhochlauf also bei einer Absaugleistung kleiner 9 NL/min erfolgte, war in diesen Fällen die folgende Extrapolation des korrigierten Anfangsdrucks notwendig: Zunächst wurden zwei Steigungen berechnet, vom ersten bis zum zweiten Messwert (Steigung 1) und vom dritten bis zum siebten Messwert (Steigung 2). Falls Steigung 1 mehr als doppelt so hoch war wie Steigung 2, wurde der erste Messwert durch Extrapolation aus Steigung 2 nachträglich bestimmt. Die gesamte Druckdifferenz wurde dann zwischen dem ggf. korrigierten Anfangswert und dem jeweiligen Maximalwert des Messverlaufs bestimmt. Das gilt auch für Messfälle mit zunächst ansteigendem und dann aber wieder abklingendem Druckverlauf (vgl. Abb. 4, unten).

Für die Delta-p-Auswertung wurden insgesamt 363 Datensätze gewonnen, wobei ein Datensatz jeweils aus einem Wertepaar besteht (Staubmessergebnisse sowie berechneter Differenzdruck). Diese Anzahl Datensätze stimmt nicht mit der für die Fragebogenerhebung gewonnenen Datensätze überein (Kapitel 5), da die Daten für den Differenzdruck nicht immer vollständig erfasst worden waren.

In 44 der 363 Fälle wurde eine Überschreitung des Kohlenmonoxid-Grenzwertes nach 1. BImSchV festgestellt wobei 22 Anlagen am Grenzwert von 4000 mg CO/Nm³ scheiterten, Die übrigen Anlagen scheiterten am Grenzwert von 2000 mg/Nm³ (15 Anlagen), 1000 mg/Nm³ (5 Anlagen) und 500 mg/Nm³ (2 Anlagen).

Da sich gezeigt hatte, dass die Messunsicherheiten auch für den Parameter Staub in solchen Fällen besonders hoch sind, blieben diese Datensätze bei den weiteren Auswertungen zum Delta-p-Verfahren unberücksichtigt, zumal die entsprechenden Anlagen ohnehin beanstandet werden würden. Von den verbliebenen 319 Datensätzen wurden weitere 13 Datensätze wegen offensichtlicher Unregelmäßigkeiten im Messablauf und zweifelhaften Messumständen eliminiert. Als Gründe für die Eliminierung sind unter anderem gerissene Messhülsen, Verpuffungsreaktionen, Falschlufteintritt durch den Asche-

kasten, unplausible Sauerstoffwerte, vorzeitiges Abschalten oder defekte Luftklappen zu nennen. Das geht aus den Messprotokollen und Aufzeichnungen bzw. aus den berichteten Messdaten des jeweiligen Kaminkehrers hervor. Die verbliebene Datengrundlage von insgesamt 306 Wertepaaren wurde anschließend für die Identifikation eines geeigneten Schwellenwertes verwendet (Kapitel 4.2).

3.4 Erfassung standortbezogener Daten mittels Fragebogen

Zur Erfassung weiterer Daten zum Standort und zum Betrieb wurde ein Fragebogen entworfen, in dem die messenden Kaminkehrer eine Vielzahl relevanter Angaben festhielten. Die Daten sollten der Identifikation von Ursachen für abweichende Messergebnisse und der Suche nach Erklärungen für auffällige Messwerte dienen. Außerdem charakterisieren sie den bestehenden Anlagenbestand, da Kenndaten erfragt werden, die bei der üblichen Datenerfassung im Rahmen der Messungen nicht erhoben werden. Die Ergebnisse dieser Erhebung werden in Kapitel 4.3 ausgewertet und dargestellt.

Der Fragebogen wurde parallel zur Messung vor Ort und z. T. mit Unterstützung des Anlagenbetreibers ausgefüllt. Ein Muster ist nachfolgend dargestellt.

Datenerfassungsblatt für Δp -Messungen zum Feldversuch

Name: Straße: Wohnort:

Lfd.-Nummer:	Heizungs-Nummer: 07/
Eigentümer:	Betreiber:
Str./Nr.:	Standort:
PLZ/Ort:	PLZ/Ort:
Tel./Fax:	Tel./Fax:

Feuerstätte:	Vorofen:
Typ/Baujahr:	Typ/Baujahr:
Leistung in kW:	Leistung in kW:
Anlagenart:	Brennstoff:
Errichtet:	<input type="checkbox"/> Stückholz <input type="checkbox"/> Hackgut <input type="checkbox"/> Pellets <input type="checkbox"/> Sägemehl
Handbeschickt: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> Spanplatten <input type="checkbox"/> Schleifstaub _____
externes Gebläse: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	hoher Nadelanteil <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Unterer Abbrand: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	hoher Rindenanteil <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Heizung <input type="checkbox"/> Luftherhitzer <input type="checkbox"/>	mehliges Brennstoff <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Puffersp.: <input type="checkbox"/> Liter: _____	minderwe. Brennstoff <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Gewerbe: <input type="checkbox"/> Art: _____	Material: trocken <input type="checkbox"/> feucht <input type="checkbox"/> nass <input type="checkbox"/>
Messzyklus: * 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/>	Größe: grob <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> fein <input type="checkbox"/>
Rauchrohr:	Kamin:
Länge:	Länge:
Querschnitt:	Querschnitt:
Umlenkungen: __ x 30° __ x 45° __ x 90°	Nebenlufteinrichtung: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Abst. MÖ Feuerst./Bog. _____ cm	Entstaubung: welche?
Rauchrohrführung im Bereich der MÖ waagrecht <input type="checkbox"/> schräg <input type="checkbox"/> senkrecht <input type="checkbox"/>	Verantwortlicher: Bemerkung:

*1) 15 Min. Volllast

2) 5 Min. Volllast - 10 Min Teillast

3) 15 Min Teillast (Gebläse)

Letzte Kaminreinigung:	automatische Abreinigung der Feuerstätte
Letzte Rauchrohrreinigung:	während der Messung <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Letzte Kesselreinigung:	wenn ja: Taktdauer: _____
Letzter Service:	

Grenzwert CO g/m ³ :	Grenzwert Staub g/m ³ : 0,15
Seriennummer: 07	Datensatz:

Art	Datum	Startzeit	Hülsen-Nummer	Verbre. Lufttem.	Wärmeträger	Abgastemp.	Sauerstoff %	Zug in hpa	CO-gem in ppm	CO-gem g/13%	Staub g/Nm ³	Δp
Werte vom Vorjahr eintragen:												

4 Ergebnisse zum Delta-P-Messverfahren

4.1 Korrelation des Differenzdrucks mit gravimetrisch gemessenen Werten

Anders als im vorangegangenen Projekt /3/, bei dem beiden Messverfahren unter standardisierten Bedingungen (Feuerungsprüfstand) eingesetzt worden waren, ist die Korrelation der Messwerte Druckdifferenz und Staubgehalt im vorliegenden Praxisversuch wesentlich geringer und der Zusammenhang lässt sich nicht mehr in Form einer linearen Regression darstellen. Da aber ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Messwerten bereits im vorherigen Messprojekt nachgewiesen worden war /3/, konnte bei den nachfolgenden Auswertungen davon ausgegangen werden, dass die gewonnenen Differenzdruckdaten dennoch für eine Beurteilung der Anlage und der Staubemission nützliche Informationen liefern. Eine grafische Darstellung der Messwertkorrelation bietet Abb. 6.

Messungen, bei denen der Grenzwert für Kohlenmonoxid (CO) nach 1. BImSchV überschritten war, wurden bei den weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt, da hohe Kohlenmonoxidwerte offenbar zu einer großen Messunsicherheit beim Delta-P-Wert beitragen bzw. die Feuerungsanlage ohnehin beanstandet werden muss.

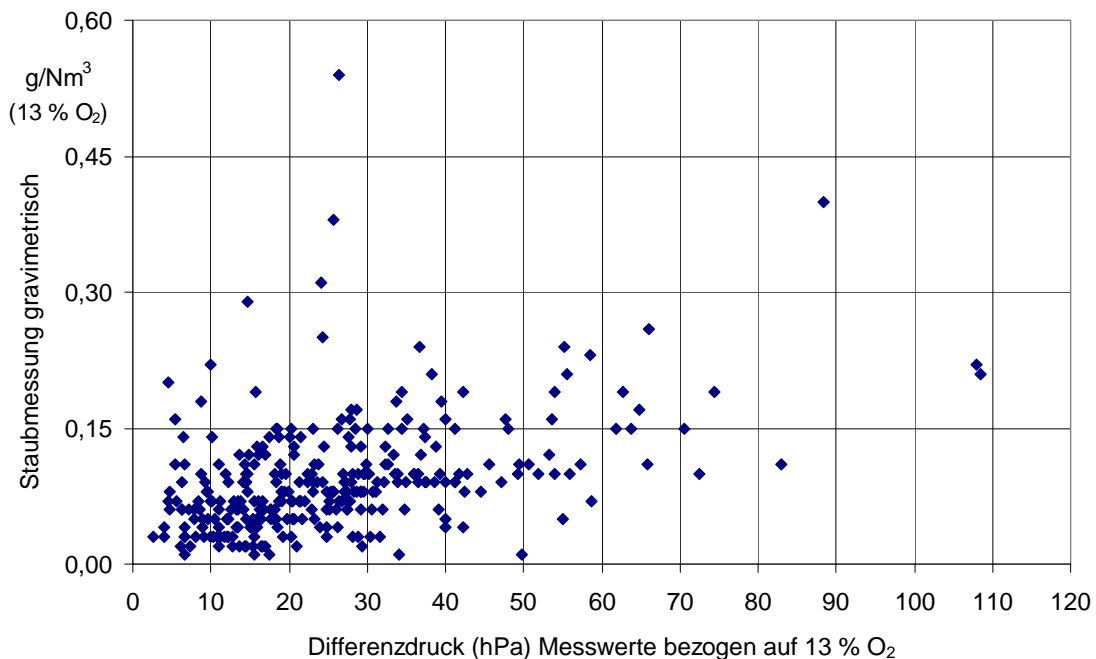


Abb. 6 Zusammenhang der 306 Messwerte für den Differenzdruck und die gravimetrische Staubbestimmung (ohne CO-Grenzwertüberschreitungen)

Bei der Betrachtung der in Abb. 6 dargestellten Streuung ist zu beachten, dass sich die gemessenen Staub-Emissionswerte immer auf die Partikelgesamtmasse beziehen, während der Differenzdruck von weiteren Staubeigenschaften beeinflusst sein kann. Hierzu zählen Staubmerkmale wie Teilchengröße, -form und -dichte. So ist es beispielsweise denkbar, dass bei gleicher Staubbelastung (in Masseneinheiten) vollkommen unterschiedliche Beladungs-Schichtdicken auf der Filterhülse auftreten. Das ist vor allem dann der Fall, wenn die Dichte der Staubschicht sehr verschieden ist (z. B. wegen unterschiedlicher Aschezusammensetzung bei verschiedenen Brennstoffen wie Holz oder Halmgut). Wenn diese Stäube zusätzlich – etwa wegen der verschiedenen Korngrößen – zu einer unterschiedlichen Durchlässigkeit des Filterkuchens führen, kommt es zu einer weiteren Streuung der Messwerte. Bei der Abhängigkeit des Delta-p-Werts von der Staub(massen-)belastung der Filterhülse ist daher nicht von einem einfachen zweidimensionalen Zusammenhang sondern vielmehr vom Zusammenwirken mehrerer Bestimmungsgrößen auszugehen. Denkbar sind beispielsweise Einflüsse durch die Brennstoffart, Glutbett-Temperatur, Leistungsausschöpfung, O₂-Überschuss, Wassergehalt etc. Diese Einflüsse konnten hier allerdings nicht systematisch untersucht werden.

Ohnehin bestand das Ziel des Projektes nicht darin, eine direkte Umrechnung der Differenzdruckmesswerte in eine tatsächliche äquivalente Massenbelastung vorzunehmen. Vielmehr sollte ein Schwellenwert für den Differenzdruck gefunden werden, bei dem staubsichere Anlagen mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt würden. Diese Betrachtungen werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

4.2 Identifikation eines Schwellenwertes S_p für den Differenzdruck (Delta-p)

Mit der Delta-P-Messverfahrensentwicklung wird als wesentliches Ziel eine Schwellenwertüberwachung direkt vor Ort zur Identifikation „staubsauberer“ Anlagen angestrebt. Dadurch soll dem Anwender die Möglichkeit eröffnet werden, das Ergebnis der Messung schon unmittelbar nach der Messdurchführung zu erfahren.

Um die Tauglichkeit des Delta-p-Verfahrens für eine solche Verwendung beurteilen zu können, wurde – wie schon im vorangegangenen Projekt /3/ – auch hier eine Analyse der Wahrscheinlichkeiten für eine Falschbeurteilung bei unterschiedlichen Schwellenwerten S_p durchgeführt. Dazu wurde zunächst der Gesamtdatenbestand von 363 gültigen Versuchen um die Anzahl der Datensätze mit Überschreitung des CO-Grenzwerts nach 1. BImSchV reduziert und um 13 weitere zweifelhafte Messungen bereinigt (vgl. Kapitel 3.3). Für das hier vorliegende klassische Zwei-Klassen-Problem (Staubemission $>$ oder \leq 150 mg/Nm³), ist die verbleibende Stichprobenanzahl von 306 Wertepaaren für die weitere Analyse ausreichend groß.

Um einen beliebigen Schwellenwert beurteilen zu können, müssen zunächst die Messungen, die jeweils als "Falschbeurteilung" zu werten sind, identifiziert werden. Zu dieser Vorgehensweise bietet Abb. 7 eine Erläuterung. In den darin dargestellten vier Quadranten werden die vier möglichen Kombinationen für eine Zuordnung der Staubemissions- (E_B) und Differenzdruck(Delta-p)-Messwerte aufgeführt. Dabei stellt S_p den zu findenden Grenzwert für die Schwellenwertüberwachung des Differenzdruckes und S_E den Emissionsgrenzwert von 150 mg/Nm³ bei 13 % O₂ dar. Liegt ein Wertepaar nach Abb. 7 im *Bereich I*, so ist die Staubgrenzwertüberschreitung nicht durch den Delta-p-Messwert zu

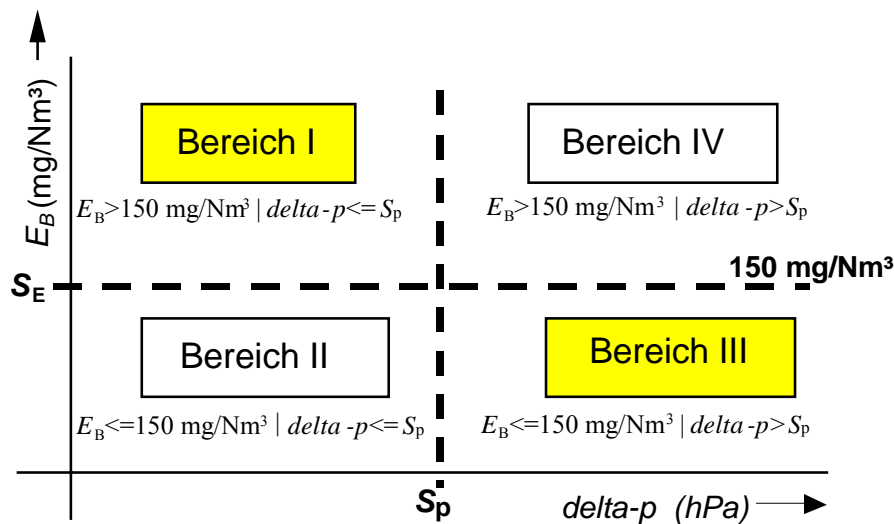


Abb. 7 Kombinationen von Druckdifferenz Δp und Staubemission E_B

erkennen. Für diesen Bereich muss folglich die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \Delta p \leq S_p\}$ durch geeignete Wahl von S_p minimiert werden. Die Schreibweise $P\{E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \Delta p \leq S_p\}$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis $E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$, wenn das Ereignis $\Delta p \leq S_p$ eingetreten ist. Auf Grund der großen Stichprobe lassen sich die Wahrscheinlichkeiten durch die entsprechenden Häufigkeiten beschreiben. Für den *Bereich I* in Abb. 7 gilt Gleichung (1) und (2):

$$P\{A \mid B\} = \frac{P\{A \cap B\}}{P\{B\}} \approx \frac{N_{A \cap B} / N_{\text{möglich}}}{N_B / N_{\text{möglich}}} \quad (1)$$

$$P\{A \mid B\} \approx \frac{N_{A \cap B}}{N_B} \quad (2)$$

mit:

$P\{A \mid B\}$: Wahrscheinlichkeit P für Ereignis A, wenn Ereignis B eingetreten ist

N_A, N_B : Anzahl der Ereignisse A, B

$A \cap B$: Ereignis A und B

A: Ereignis wenn $E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$

B: Ereignis wenn $\Delta p \leq S_p$

Liegt ein Messwert nach Abb. 7 im *Bereich III*, so müsste die Filterhülse gravimetrisch analysiert werden, obwohl der Staubgrenzwert S_E nicht überschritten ist. Die Kostenfunktion $P\{E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3 \mid \Delta p > S_p\}$ muss daher ebenfalls durch geeignete Wahl des Differenzdruck-Schwellenwertes S_p minimiert werden. Analog dazu gilt Gleichung (3) für den *Bereich III* nach Abb. 7, der eine „unnötige“ gravimetrische Analyse beschreibt :

$$P\{C \mid D\} \approx \frac{N_{C \cap D}}{N_D} \quad (3)$$

mit:

$P\{C|D\}$: Wahrscheinlichkeit P für Ereignis C , wenn Ereignis B eingetreten ist

N_C, N_D : Anzahl der Ereignisse C, D

$C \cap D$: Ereignis C und D

C : Ereignis, wenn $E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$

D : Ereignis, wenn $\text{delta-}p > S_p$

Die Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für die Ereignisanzahl in den Bereichen I bis IV der Abb. 7 bei einem angenommenen Schwellenwert von 24 hPa.

Tabelle 1 Beispiel für die Ereignisverteilung für den Schwellenwert $S_p = 24 \text{ hPa}$

Ereignisanzahl N	$\text{delta-}p \leq S_p$	$\text{delta-}p > S_p$	Summe
$E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$	6	31	37
$E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$	157	112	269
Total	163	143	306

Aus der Minimierung der Wahrscheinlichkeiten für *Bereich I* und *Bereich III* folgt automatisch die gewünschte Maximierung für den *Bereich II* und *Bereich IV*, siehe Tabelle 2. Mit den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich aus der Tabelle 1 die auf Grund der endlichen Stichprobe approximierte Wahrscheinlichkeit P für die Bereiche in Tabelle 2.

Tabelle 2 Beispiel für die approximierte Wahrscheinlichkeit P für den Schwellenwert $S_p = 24 \text{ hPa}$

Wahrscheinlichkeit P	$\text{delta-}p \leq S_p$	$\text{delta-}p > S_p$
$E_B > 150 \text{ mg/Nm}^3$	$P\{A B\} = 0,037$	$1 - P\{C D\} = 0,217$
$E_B \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$	$1 - P\{A B\} = 0,963$	$P\{C D\} = 0,783$
Summe	1	1

Abb. 8 zeigt den Verlauf der beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{A|B\}$ und $P\{C|D\}$ für ansteigende Schwellenwerte S_p im Bereich von 10 bis 60 hPa. Daraus wird ersichtlich, dass das Optimum für den gesuchten Schwellenwert bei einem Delta- p -Wert von 24 hPa zu suchen ist; hier liegt die "Fehlerwahrscheinlichkeit" für eine Anlagenbeurteilung nach der Differenzdruckmessung ($P\{A|B\}$) noch auf einem relativ geringen Niveau, während die Wahrscheinlichkeit für eine unberechtigte gravimetrische Auswertung der Staubhülse ebenfalls schon relativ niedrig ist. Das lässt sich anhand des Beispiels der in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellten Werte erläutern, zumal der dafür gewählte Schwellenwert ($S_p = 24 \text{ hPa}$) ebenfalls in dem genannten Optimum lag. Die Wahrscheinlichkeit $P\{A|B\}$ liegt hier bei 0,037, das heißt, dass ca. 96 % aller unterhalb des Schwellenwertes

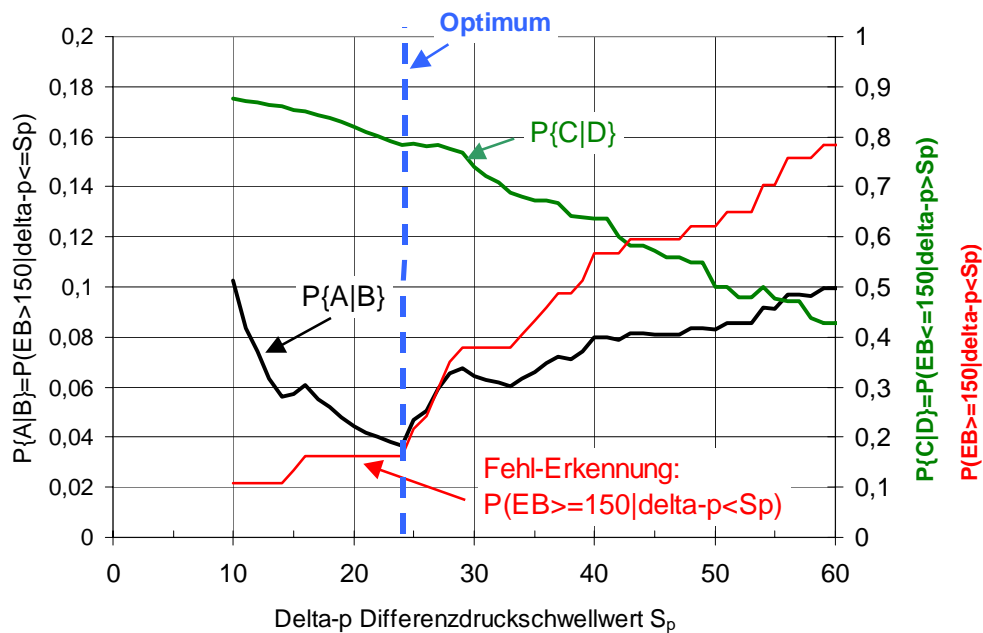


Abb. 8 Wahrscheinlichkeiten $P\{A|B\}$ und $P\{C|D\}$ sowie der Fehl-Erkennungsrate $P(E_B \geq 150 | \Delta p < S_p)$ in Abhängigkeit vom Differenzdruck-Schwellenwert S_p

liegenden Messwerte auch tatsächlich als "staubsicherer" erkannt werden. Nur 3,7 % würden mit der Delta-p-Methode nicht erkannt.

Die rotmarkierte dritte Funktion $P(E_B \geq 150 | \Delta p < S_p)$ in Abb. 8 zeigt eine weitere Interpretationsmöglichkeit auf. Hier sind für die Bestimmung der Häufigkeiten die Ereignisse nicht auf die Spalten- sondern auf die jeweilige Zeilensumme in Tabelle 1 bezogen. Beispielsweise werden bei dem hier dargestellten Optimumwert ($S_p = 24$ hPa) 6 von 37 Grenzwertüberschreitungen nicht erkannt, das entspricht einer Quote von 16 %. Gleichzeitig werden 112 von 269 Staubmesswerten, die unter dem Grenzwert von 150 mg/Nm^3 liegen, nicht erkannt. In der Praxis würde dies bedeuten, dass nur 143 von 306 Staubhülsen (47 %) eingeschickt werden müssten. Allerdings würden damit 78,3 % (112 von 143) der über das Delta-p-Verfahren beanstandeten Messwerte "unnötigerweise" gravimetrisch überprüft werden.

Im Vergleich zur vorhergehenden Untersuchung aus dem Jahr 2001 /3/ ist das Gesamtniveau des berechneten Differenzdrucks deutlich niedriger. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um echte Messwertunterschiede, die Ursache liegt unter anderem in der bereits in Kapitel 3.3 beschriebenen Extrapolation des Anfangsdrucks außerhalb der Hochlaufphase. In früheren Versuchen war dieser Effekt noch nicht berücksichtigt worden, und dadurch lag der Anfangsdruck im statistischen Durchschnitt niedriger. Hinzu kommt, dass die Delta-p-Werte hier bezogen wurden auf den auch für Staub geltenden Bezugssauerstoffgehalt von 13 % O_2 , so dass sich in den meisten Fällen eine weitere Wertreduzierung ergab. Aus diesen Gründen können die Datenbestände der ersten Versuchsserie von 2001 nicht ohne weiteres mit den Feldversuchsdaten aus 2003 kombiniert werden.

Bei der Beurteilung der Datenbasis für die hier vorgestellte Schwellenwertempfehlung ist generell zu berücksichtigen, dass es sich um Messergebnisse aus einem Feldversuch

handelt, in dem sowohl die Messungen für den Differenzdruck als auch für die gravimetrisch bestimmte Staubemission naturgemäß einer größeren Schwankungsbreite unterliegen als unter den standardisierten Bedingungen eines Feuerungsprüfstandes. Durch die Tatsache, dass die Anzahl Messgeräte und deren Bedienpersonen sowie die Messbedingungen an den Feuerungsanlagen und die eingesetzten Messmittel in einem solchen Feldversuch unvermeidlich vielfältig sind, ist die Datenqualität besonders heterogen. Die beobachteten Unschärfen bei der Identifikation von Staubauffälligkeiten nach dem Delta-p-Verfahren sollte daher nicht überbewertet werden, zumal auch die Bestimmung der "tatsächlichen" Staubwerte, die hier als Referenzwerte dienen, ebenfalls mit messtechnischen Unsicherheiten behaftet ist (vgl. /3/).

Bei der Betrachtung der beiden messtechnischen Prinzipien für die Bestimmung der Staubsicherheit bleibt außerdem die Frage offen, welche der beiden Bestimmungsmethoden die umwelt- und gesundheitlichen Risiken, die den eigentlichen Grund für die Staubmessungen darstellen, besser widerspiegelt. In dieser Diskussion spielen die Feinstäube und die möglicherweise daran anhaftenden organischen Kohlenwasserstoffe sowie die besonders feinen und leichten Rußpartikel eine besondere Rolle. Hierzu wären weitere grundsätzliche Untersuchungen wünschenswert.

4.3 Korrelation zwischen CO und gemessenen Staubmesswerten

In der Überwachungspraxis wird die Notwendigkeit der Staubemissionsmessung immer wieder in Frage gestellt. Insbesondere wird häufig vorgeschlagen, das unmittelbar vor Ort verfügbare CO-Messergebnis als alleinigen Bewertungsmaßstab zu Grunde zu legen, da – so die Argumentation – ein Teil der Staubgrenzwertüberschreitungen damit zugleich beanstandet werden würde. Um für derartige Fragestellungen geeignete Datenauswertungen verfügbar zu machen, wurden die aus dem Feldversuch stammende CO- und Staubwerte-Korrelation untersucht. Die Darstellung in Abb. 9 zeigt, dass bezogen auf den gesamten Anlagenbestand hierzu keine klare Beziehung zwischen Staub und CO besteht.

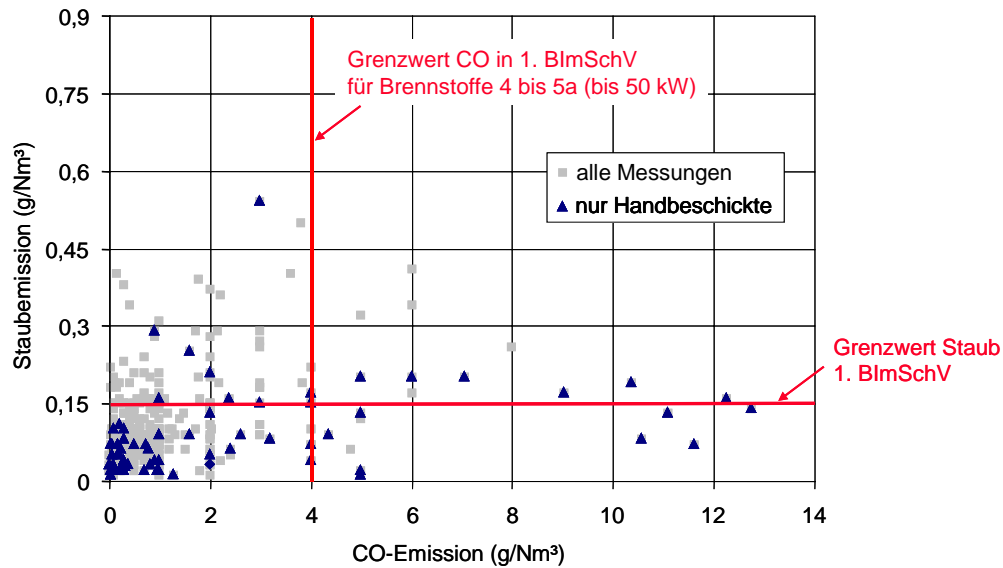


Abb. 9 Zusammenhang der Messwerte für die Kohlenmonoxid- und Staubemission, differenziert nach den Beschickungsarten (skalierungsbedingt sind nicht alle Staubgrenzwertüberschreitungen dargestellt; Datenbasis: bereinigter Datenumfang)

Allerdings wird bei handbeschickten Anlagen auch ersichtlich, dass ein größerer Teil der Staubgrenzwertüberschreitungen durch die beanstandete CO-Überschreitung mit erfasst werden würde. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass beim derzeitigen CO-Grenzwert von 4 mg/Nm³ (für Anlagen bis 50 kW) ca. 41 % der Staubgrenzwertüberschreitungen nicht wegen der CO-Überschreitung mit erfasst wären. Das zeigt Abb. 10. Bei einer Verschärfung des CO-Grenzwertes beispielsweise auf 2 g/Nm³ würde sich diese Fehl-Erkennungsquote auf nur noch 24 % reduzieren (4 von 17 Anlagen) und bei einem CO-Grenzwert von 1,5 g/Nm³ läge die Fehl-Erkennungsquote bei 11 %. Die Bezeichnung $P\{A|B\}$ in Abb. 10 kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass der Staubgrenzwert von 150 mg/Nm³ überschritten ist und zugleich das CO-Messergebnis nicht über dem hier variierten CO-Grenzwert liegt.

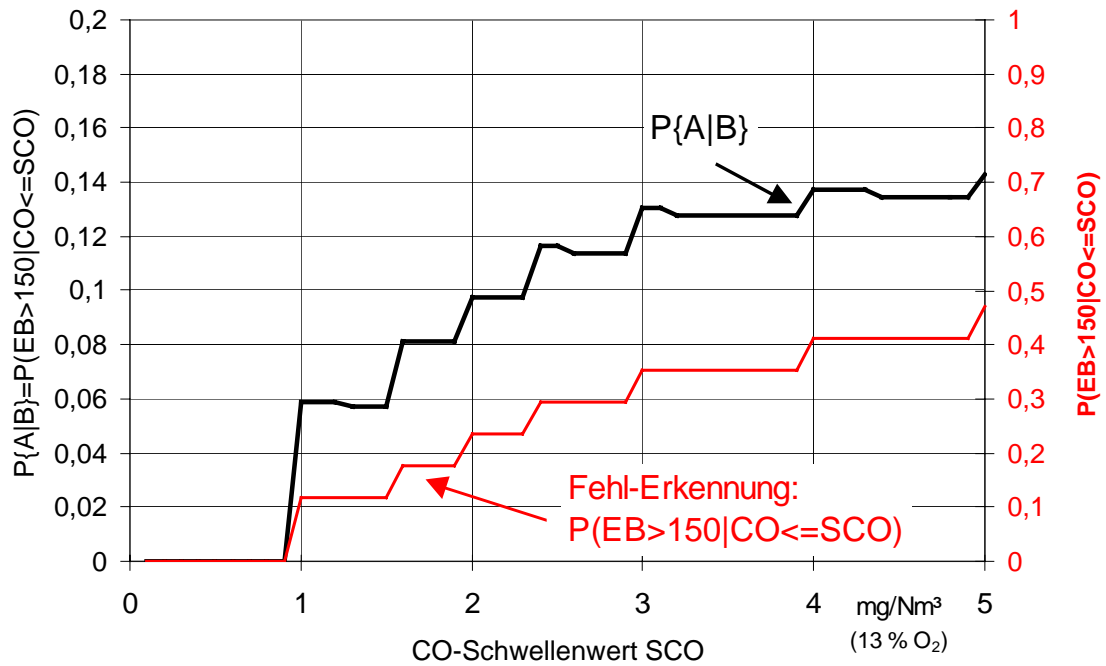


Abb. 10 Bedingte Wahrscheinlichkeiten $P\{A|B\}$ sowie die Fehl-Erkennungsquote $P(E_B > 150 | CO < SCO)$ in Abhängigkeit vom CO-Schwellenwert SCO bei den hier untersuchten handbeschickten Feuerungen

5 Ergebnisse der Befragung (Standortdaten)

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der parallel mit den Messungen durchgeführten Erhebung durch die Kaminkehrer dargestellt. Allerdings konnten nicht alle im Fragebogen behandelten Punkte (vgl. Kapitel 3.4) sinnvoll ausgewertet werden. Das liegt zum einen an einer oft missverständlichen Auffassung bezüglich des eigentlichen Sinns der jeweiligen Frage und zum anderen an der unvermeidlichen Subjektivität in der Beantwortung, da ein objektives Bewertungsschema nicht vorgegeben worden war.

Beispielsweise wurde bei der Frage nach dem Typ/Baujahr oft nur eine Antwort gegeben (Baujahr fehlte in 30 Fällen). Auch die Fragen "hoher Nadelanteil", "hoher Rindenanteil", "mehliges Brennholz", "minderwertiges Brennholz", "Material" und "Größe" waren stark vom subjektiven Verständnis des Kaminkehrers beantwortet. Sie wurden daher nicht statistisch ausgewertet. Bei den Fragen nach Wartung und Reinigung (3. Abschnitt) wurde teilweise unvollständig geantwortet, da sich die Betreiber oftmals nicht mehr an den korrekten Zeitpunkt erinnern konnten. Allerdings wurde hierzu dennoch eine statistische Auswertung des Datenbestandes durchgeführt. Das gilt jedoch nicht für die Frage nach der automatischen Abreinigung der Feuerstätte während der Messung, da hier oftmals gar keine Taktdauer oder nur sehr unplausible Angaben gemacht wurden.

Nachfolgend werden die wichtigsten statistischen Daten und Beobachtungen bei den gemessenen Anlagen zusammengestellt.

5.1 Allgemeine Daten über den betrachteten Anlagenbestand

Feuerungsbauart und Brennstoffe. In 78 von insgesamt 397 untersuchten Anlagen erfolgte die Beschickung von Hand. Das entspricht 20 % der betrachteten Anlagen. Bei den handbeschickten Anlagen handelt es sich sowohl um einmalige Erstmessungen (z. B. bei Neuanlagen) als auch um wiederkehrende Messungen an Anlagen über 50 kW Nennwärmeleistung, wenn die Betreiber gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz (Ziffer 6 nach §3 (1) der 1. BImSchV /2/) und Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder verleimtes Holz (Ziffer 7) in einem holzbe- und -verarbeitenden Betrieb einsetzen.

Von den insgesamt 397 Anlagen waren 42 mit einem Vorofen ausgestattet. Die Hälfte dieser Anlagen hatten ein Herstellungsdatum von vor 1995. Bei vier der 397 Anlagen handelte es sich um reine Luftherhitzeranlagen ohne Zentralheizungsnutzung.

Zu den im Fragebogen erfragten 6 Brennstoffen (Stückholz, Hackgut, Pellets, Sägemehl, Spanplatten und Schleifstaub) kamen verschiedentlich Mehrfachnennungen zustande. 75-mal wurde Stückholz genannt; in 261 Fällen kam Hackgut als Brennmaterial zum Einsatz. In weiteren 17 Anlagen wurden Pellets und in 34 Fällen Sägemehl eingesetzt; Spanplatten wurden 41-mal und Schleifstaub 25-mal verwendet. Die drei Letztgenannten wurden ausschließlich in gewerblichen Anlagen (Schreinereien, Sägewerke und Zimmereien) eingesetzt.

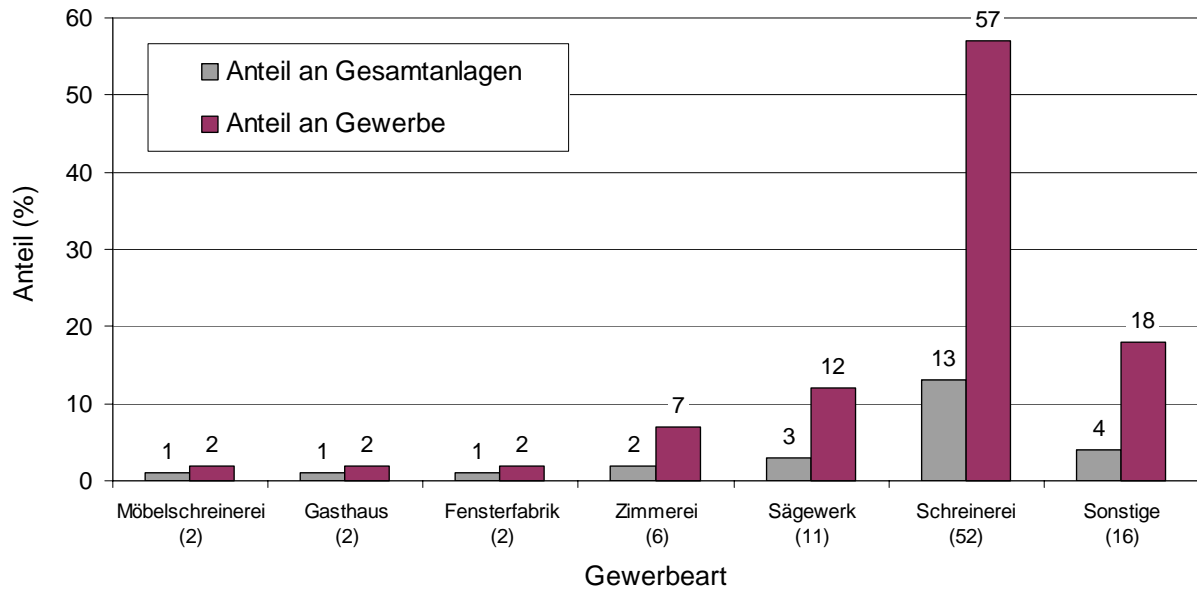


Abb. 11 Verteilung der Gewerbearten in der Befragung bei allen hand- und automatisch beschickten Feuerungen in der Untersuchung

Betreiber/Standort. Bei der Frage nach einer möglichen gewerblichen Nutzung wurden insgesamt 22 verschiedene Gewerbearten genannt. Mit insgesamt 52 Nennungen sind Anlagen in Schreinereien am häufigsten (57 % der Gewerbebetriebe, vgl. Abb. 11). Knapp ein Viertel aller untersuchten Anlagen befindet sich in gewerblicher Nutzung.

Anlagenhersteller. Die 397 untersuchten Anlagen konnten insgesamt 47 verschiedenen Herstellern zugeordnet werden. Am häufigsten war die österreichische Firma Hargassner mit 60 Nennungen vertreten (= 15 % Gesamtanteil). Auf den weiteren Plätzen folgen die Firmen Fröling, mit 56 Nennungen (14 %) und HDG mit 44 Anlagen (11 %) (Abb. 12). Auffällig war, dass einige Hersteller offenbar in einzelnen Gemeinden besonders häufig anzutreffen waren. Das deutet darauf hin, dass die Vertriebsaktivitäten regional offenbar in sehr unterschiedlicher Intensität durchgeführt werden, weshalb auch die hier gefundene Herstellerverteilung kaum als repräsentativ für Bayern angesehen werden kann.

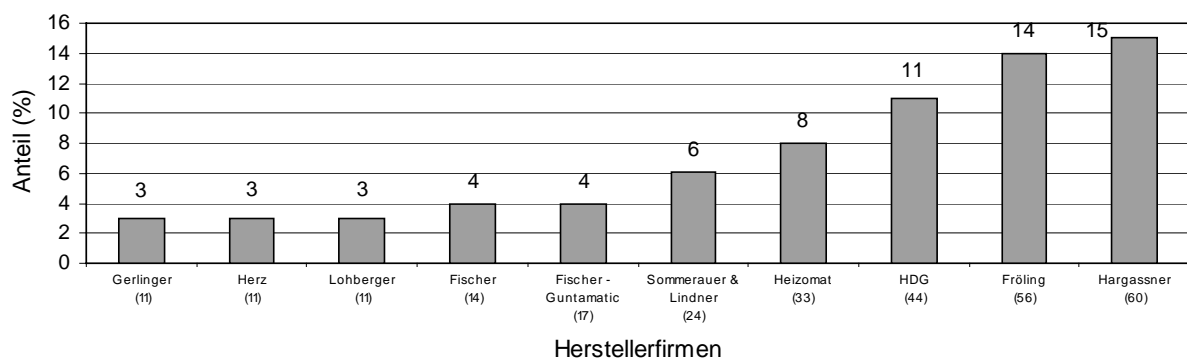


Abb. 12 Verteilung der Herstellerhäufigkeit bei allen hand- und automatisch beschickten Feuerungen in der Untersuchung. Hier: nur Hersteller mit 10 oder mehr Anlagen

Neben den in Abb. 12 genannten Herstellern sind 37 weitere Hersteller zu nennen (in alphabetischer Reihenfolge): Agromechanica, Atmos, Binder, Bioflamm, Brötie, Buderus, Bullerjan, Eder, ETA, EWI, Haas&Sohn, Hansen, Hoval, KÖB, Kurri, KWB, Lambion, Lopper, Mawera, Nolting, Ökofen, Ökotherm, Polzer, Prüller, Rendl, Ritter, Rohleder, SBS, Schmid, Schuster, Spänex, Stellrad, Thermo-Strom, Wagner, Weiss, Windhager und Zima. Allein 18 dieser Hersteller waren lediglich mit nur einer Anlage vertreten.

Baujahr. In der Untersuchung stammten die ältesten Anlagen aus dem Jahr 1974 (2 Anlagen). Die jüngsten der Befragung wurden im Jahr 2003 gebaut (Abb. 13). Von 8 % der befragten Angaben fehlten die Angaben zum Baujahr.

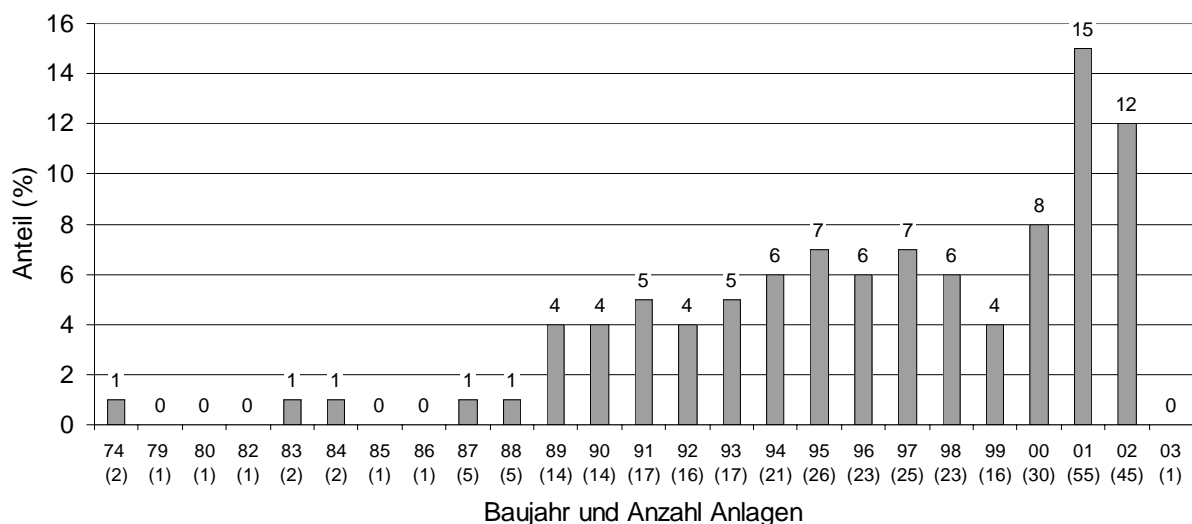


Abb. 13 Verteilung der verschiedenen Baujahre bei allen hand- und automatisch beschickten Feuerungen in der Untersuchung

Wärmespeicher. Von den 397 Anlagen besaßen 104 Feuerungen einen Wärmespeicher, das entspricht 27 % aller untersuchten Anlagen. Bei den handbeschickten Zentralheizungskesseln ist das Vorhandensein eines solchen Wärmespeichers üblich, allerdings werden immerhin noch 17 % der Anlagen dieser Bauartengruppe ohne Speicher betrieben. Dagegen stellt die Nutzung eines Wärmespeichers bei den automatisch beschickten Anlagen mit nur 12 % Anteil eher eine Ausnahme dar. Abb. 14 gibt einen Überblick in die üblicherweise in der Praxis anzutreffenden Wärmespeichervolumina (Gesamtvolumen). Eine Berechnung der spezifischen Speichervolumina in Litern je kW Nennwärmeleistung ist in Abb. 27 (Kapitel 5.2) dargestellt.

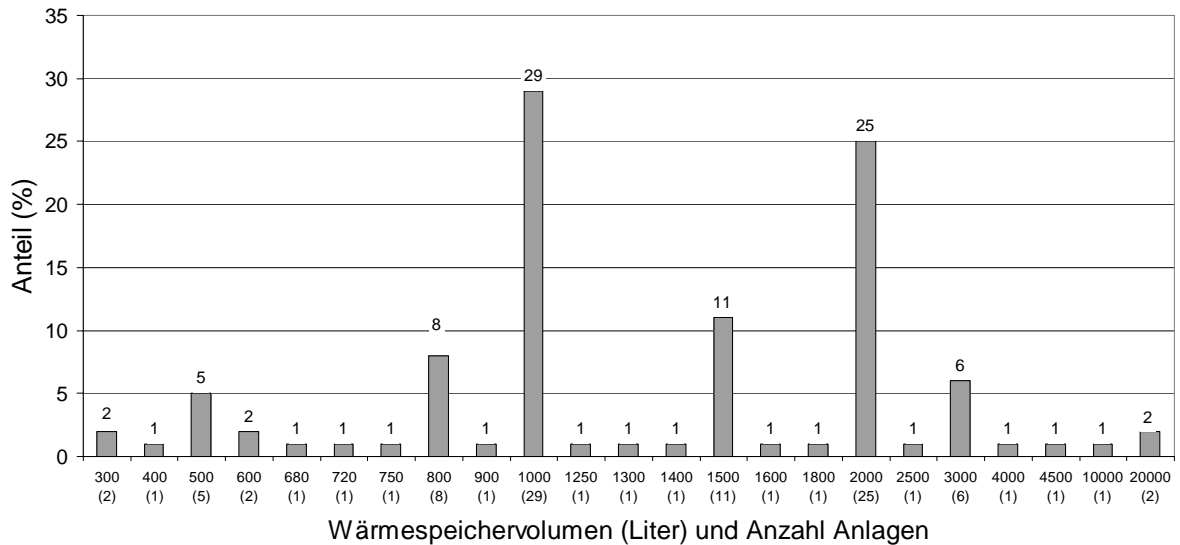


Abb. 14 Häufigkeit verschiedener Wärmespeichervolumina in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Rauchrohlänge. In der Untersuchung wurde die größte Rauchrohlänge mit 12 Meter festgestellt, die kürzeste Länge betrug nur 10 cm. Beide Extreme sind nicht vorteilhaft. Am häufigsten kommen Rauchrohlängen bis 1 Meter vor (39 %). Eine Länge von 2 Metern wird nur bei 25 % der Anlagen überschritten (Abb. 15). Im Durchschnitt beträgt die Rauchrohlänge 1,29 m.

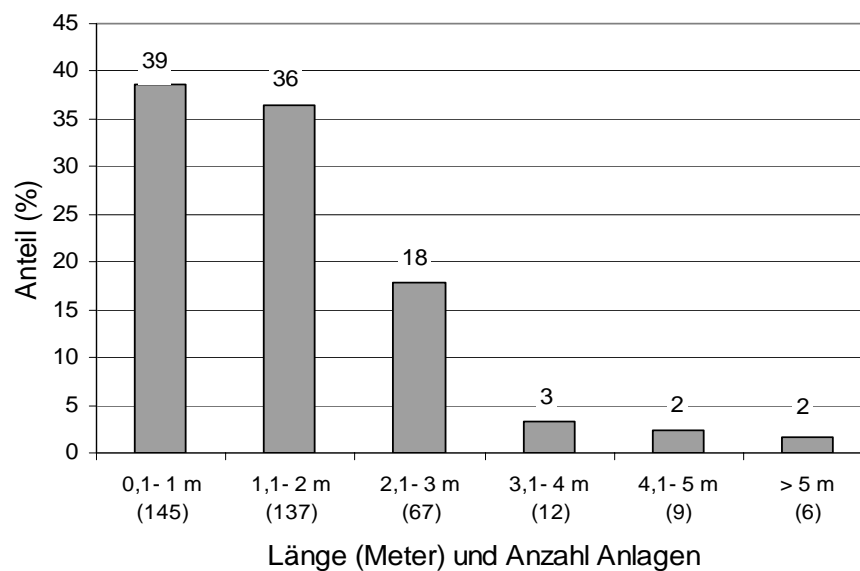


Abb. 15 Häufigkeit verschiedener Rauchrohlängen in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Rauchrohrdurchmesser. Neben der Länge ist auch der Durchmesser des Rauchrohres wichtig. Der größte Durchmesser betrug 50 cm, der kleinste lag bei 12 cm (Abb. 16). Am häufigsten ist ein Durchmesser von 18 cm.

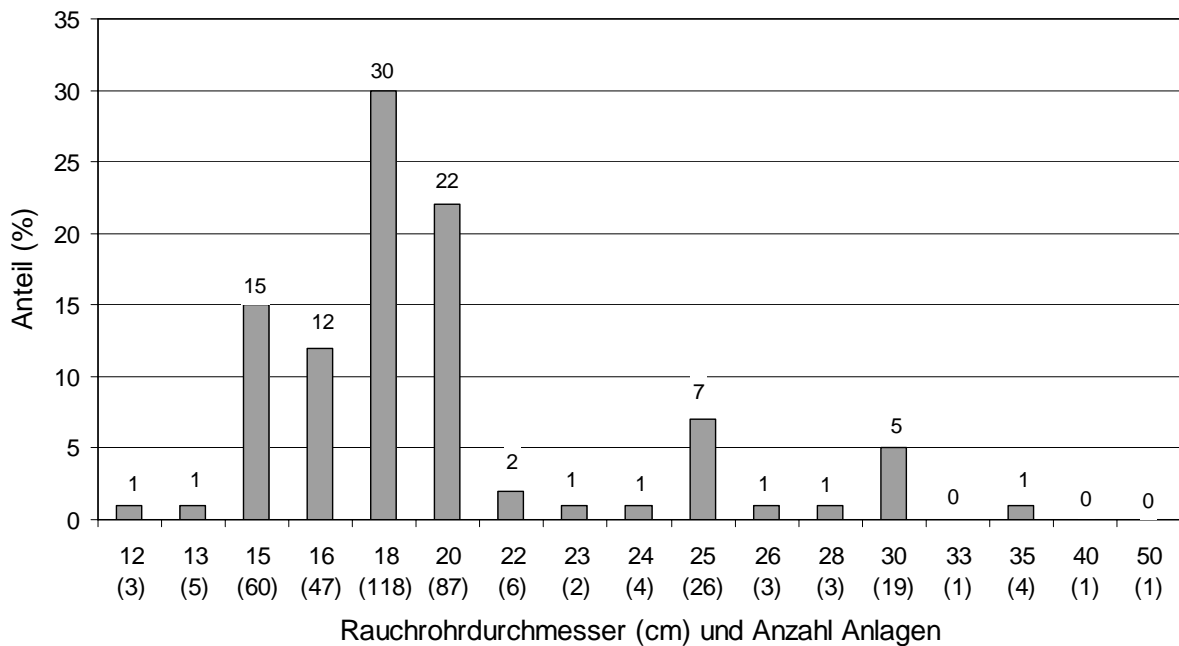


Abb. 16 Häufigkeit verschiedener Rauchrohrdurchmesser in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Umlenkungen. Befindet sich der Kamin nicht im passenden Winkel zum Ofen, so muss das Rauchrohr durch einen Bogen umgelenkt werden. Im Handel übliche Bögen weisen Winkel von 30°, 45° und 90° auf. Bei den betrachteten Anlagen waren teilweise auch verschiedene Rauchrohrbögen kombiniert worden. Es wurden Anlagen untersucht, die bis zu vier 90°-Umlenkungen im Rauchrohr aufwiesen. Mit Abstand am häufigsten wurde ein oder mehrere 90°-Winkel verwendet (Abb. 17).

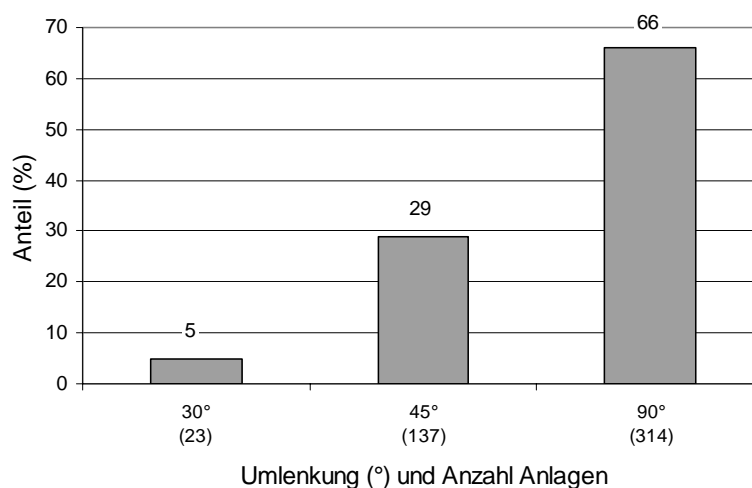


Abb. 17 Häufigkeit verschiedener Umlenkwinkel im Rauchrohr (inkl. Mehrfachnennungen) in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Abstand von der Messöffnung der Feuerstätte zum Bogen. Grundsätzlich sollte sich der Entnahmestort des Rauchgases 2 D (D: Abgasrohrdurchmesser) hinter dem Austritt aus dem letzten Abscheider/Wärmetauscher im Kernstrom befinden. Ist dieser Ort ungeeignet (Krümmung/Ablagerungen/Wirbel), richtet man sich zweckmäßig nach den allge-

mein für Staubmessungen gültigen Regeln der Technik: Die Entnahmestelle soll, wenn möglich, in einer vertikalen Abgasleitung liegen, in der ungestörte Strömungsverhältnisse herrschen, d. h. der Abstand der Entnahmestelle von der nächsten Umleitung, Einschnürung etc. stromauf beträgt mind. $5 \times D$ (Rohrdurchmesser), und stromab mind. $2 \times D$ (Rohrdurchmesser), besser $5 \times D / 6$. An einer solchen Stelle ist die Staubbelastung über dem Querschnitt des Abgasrohres gleich, auch die Kornfraktion ist unverändert.

In der Praxis kann die o.g. Forderung nach ausreichend langen Beruhigungsstrecken wegen der baulichen Gegebenheiten oft nicht erfüllt werden, so dass eine Vielzahl von Kompromissen zu schließen sind. Die Bandbreite der Abstände zum Bogen (vor oder hinter der Messöffnung) lagen in der vorliegenden Erhebung zwischen 0 und maximal 140 cm. Am häufigsten wurde ein Abstand von 30 cm (69-mal) gemessen. Bezogen auf den ebenfalls erfragten Rauchrohrdurchmesser lässt sich feststellen, dass die Forderung einer Auslaufstrecke von mindestens dem 2-fachen des Rauchrohrdurchmessers in mindestens 19 % der Fälle nicht erfüllt ist und in weiteren 45 % der Fälle knapp oder gerade noch erreicht wird. (Abb. 18).

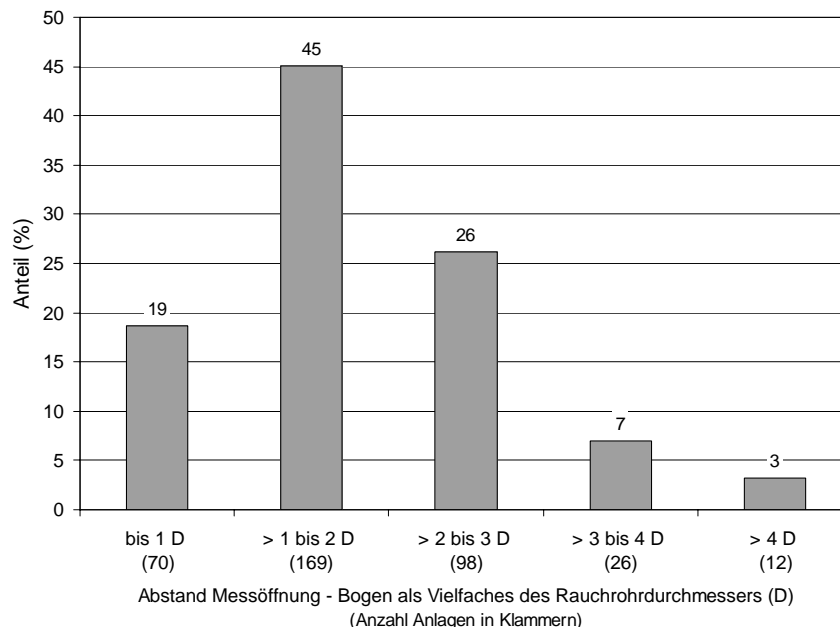


Abb. 18 Häufigkeit verschiedener Messpositionen im Rauchrohr, Abstand zwischen Staubprobenahme-position und nachfolgendem Bogen (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Rauchrohrführung. Neben der Länge und dem Durchmesser des Rauchrohrs ist auch die Rauchrohrführung ein wichtige Einbauvariable. Das Rohr kann waagrecht, schräg oder auch senkrecht von der Feuerstätte zum Kamin geführt sein. Die waagerechte Rauchrohrführung ist mit 47 % der Fälle am häufigsten, während eine schräg geführte und eine senkrechte Führung mit 33 bzw. 20 % weniger häufig vorkommen (vgl. hierzu auch Abb. 34 in Kapitel 5.2).

Kaminlänge und -durchmesser. Die Bandbreite der Kaminlängen reichte von 2 Metern bis zu 27 Metern (vgl. Abb. 19). Am häufigsten war die Länge von 10 Metern (73 Nennungen).

Der durchschnittliche Kaminquerschnitt lag bei 21,2 cm. Am häufigsten wurde ein Durchmesser von 18 cm genannt (134-mal). Die Bandbreite der Kamindurchmesser schwankt zwischen 12 und 50 cm (Abb. 20), wobei die kleinsten Durchmesser (12 und 14 cm) ausschließlich für Pelletfeuerungen verwendet werden.

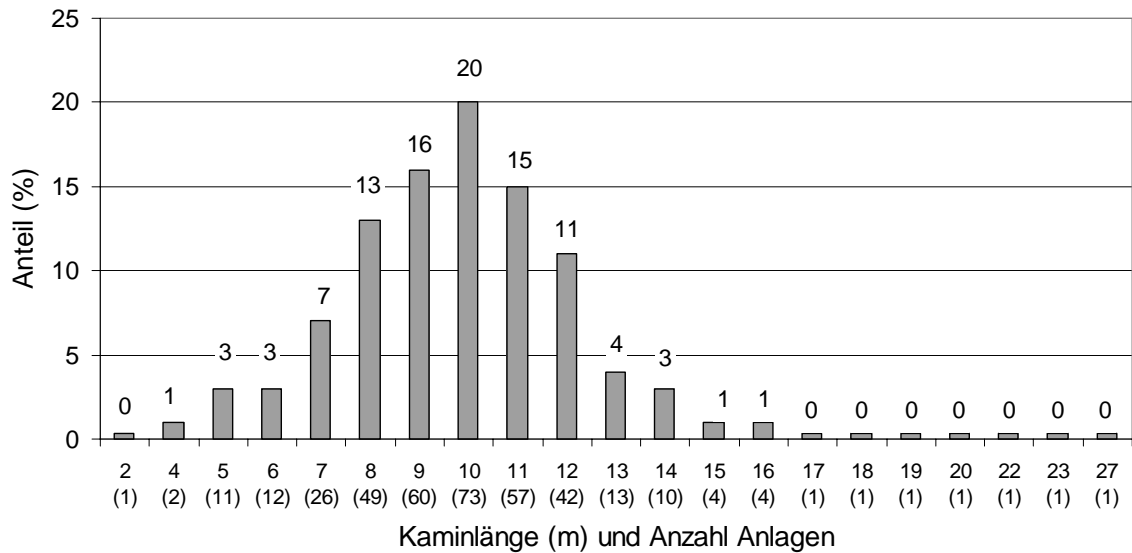


Abb. 19 Häufigkeit verschiedener Kaminlängen in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

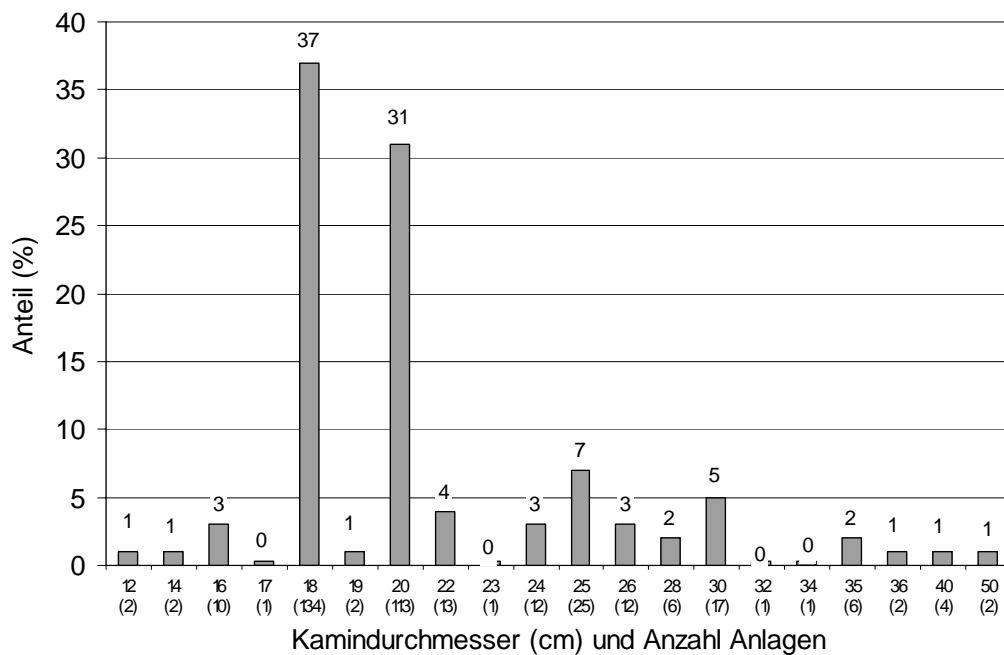


Abb. 20 Häufigkeit verschiedener Kamindurchmesser in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Nebenlufteinrichtungen. Nebenlufteinrichtungen dienen der Begrenzung des Kaminzuges durch selbsttätiges Öffnen von gewichtsbelasteten Belüftungsklappen im Kamin. Dadurch wird die Gefahr eines überhöhten Luftüberschusses im Brennraum reduziert. Von den 397 untersuchten Anlagen wiesen nur 138 eine Nebenlufteinrichtung auf. Das entspricht einem Anteil von 35 % der Gesamtanlagen (vgl. auch Abb. 35 in Kapitel 5.2).

Entstaubungseinrichtung. Bei 11 % (42 Nennungen) der untersuchten Feuerstätten wurde eine "Entstaubungseinrichtung" festgestellt. Hierzu wurde in 30 Fällen ein Zyklon genannt.

Letzte Rauchrohrreinigung. Bei vielen Betreibern war das Rauchrohr erst einige Tage vor dem Messtermin gereinigt worden. Vielfach lag die Reinigung aber auch schon ca. ein Jahr zurück (Abb. 21). In 33 Fällen fehlte die Angabe über die letzte Rauchrohrreinigung.

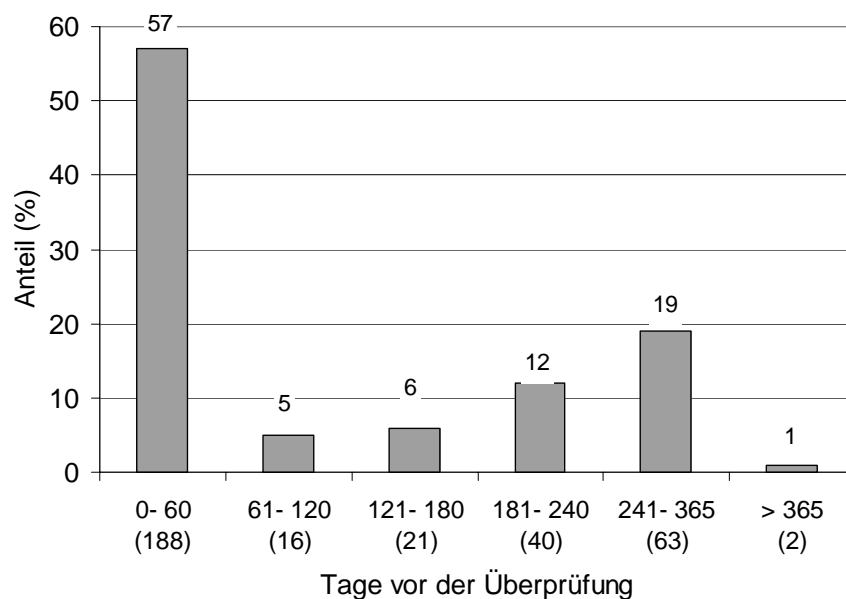


Abb. 21 Zeitpunkt der letzten Rauchrohrreinigung in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Letzte Kesselreinigung. Wie das Rauchrohr wurde auch der Kessel bei vielen Anlagen erst kurz vor dem Messtermin gereinigt (Abb. 22). Diese Maßnahme kann vom Betreiber selbst durchgeführt werden. Als längste Reinigungspause wurde eine Zeitspanne von über 2 Jahren festgestellt (823 Tage). In 36 Fällen fehlte die Angabe zur letzten Kesselreinigung.

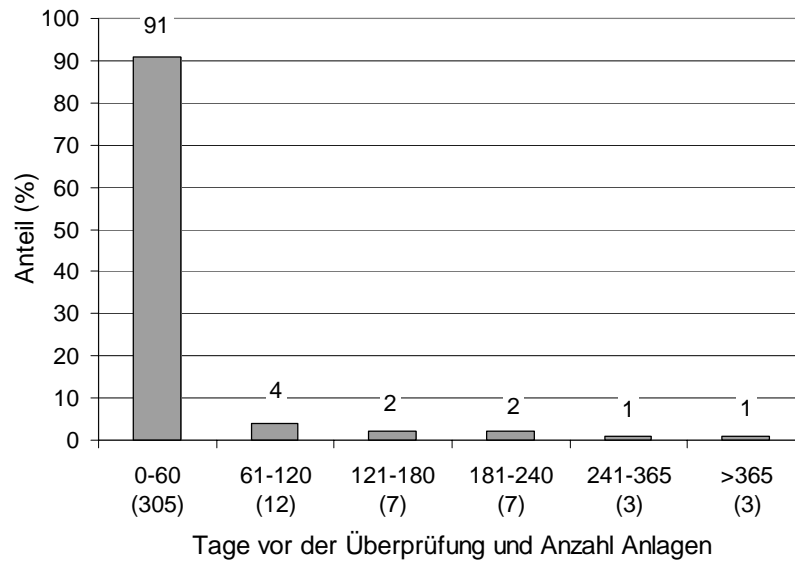


Abb. 22 Zeitpunkt der letzten Kesselreinigung in der Untersuchung (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

Letzter Service (Kundendienst). Hierunter wird eine Maßnahme des Kundendienstes der Herstellerfirma verstanden. Dabei wird die Anlage gewartet, modifiziert und Probleme erkannt. Bei manchen Feuerstätten der Befragung ist dieser letzte Service schon über 18 Jahre her. Häufig konnte der Termin des letzten Services auch nicht mehr benannt werden (143 Fälle), daher wird hier keine Angabe gemacht. Als Grund für die unvollständige Inanspruchnahme solcher Serviceleistung sind die damit verbundenen Kosten von ca. 250 € je Maßnahme anzusehen.

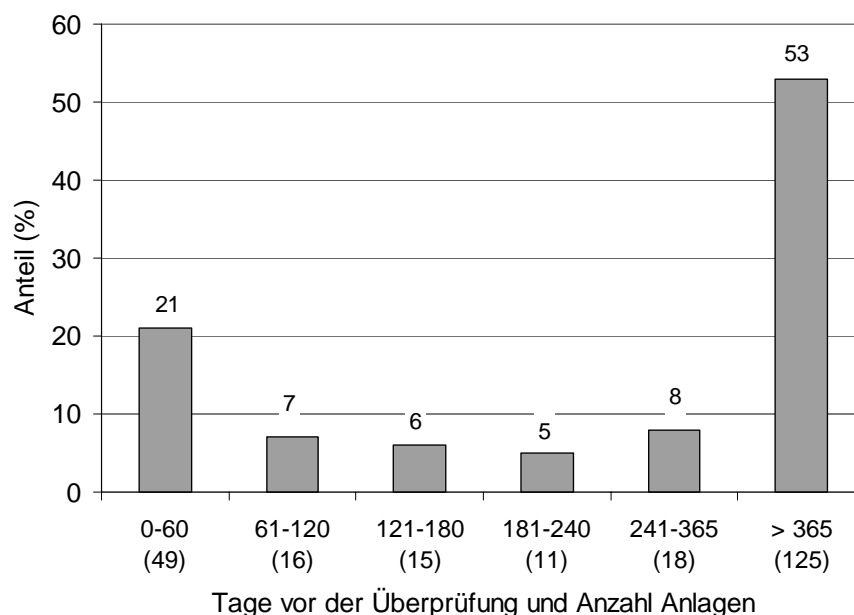


Abb. 23 Zeitpunkt der letzten Servicemaßnahme durch den Kundendienst (hier: hand- und mechanisch beschickte Anlagen gemeinsam)

5.2 Zusammenhang zwischen Staub-Beanstandung und Anlagenmerkmalen

Basierend auf der in Kapitel 5.1 vorgestellten Bestandsaufnahme soll nachfolgend festgestellt werden, ob ein Zusammenhang zwischen verschiedenen Anlagen- und Betriebsmerkmalen und der Beanstandungsquote für die Messgröße Gesamtstaub besteht. Hierbei gilt der derzeit gültige Emissionsgrenzwert von 150 mg Staub je Normkubikmeter bezogen auf 13 % Sauerstoffgehalt. Dieser Grenzwert gilt für alle Holzfeuerungsanlagen bis unter 1000 kW Nennwärmeleistung (vgl. 1. BImSchV /2/).

Beanstandungsquote allgemein. Bei den 397 untersuchten Anlagen kam es in 88 Fällen zu Beanstandungen wegen Staub, das entspricht einer Teilquote von 22,2 % (Beanstandungen wegen CO wurden hier nicht berücksichtigt). Bei 11 Anlagen wurde der Grenzwert nur knapp überschritten. Allerdings kommen auch Messwerte vor, bei denen der Grenzwert um ein Vielfaches überschritten wird. Der höchste gemessene Wert liegt bei 4,67 g/Nm³ während die niedrigste Staubangabe bei 0,01 g/Nm³ liegt. Bei den hand- und automatisch beschickten Anlagen war die Staub-Beanstandungsquote nahezu gleich hoch. Die Anzahl Datensätze ist hierbei höher als im Projektteil zum Delta-p-Verfahren (Kapitel 4), da die Daten für den Differenzdruck nicht immer vollständig erfasst worden waren.

Beschickungs- und Bauart. Bei den handbeschickten Anlagen lag die Beanstandungsquote mit 24,4 % etwas höher als bei den automatisch beschickten Anlagen (21,6 %). Allerdings handelt es sich bei den handbeschickten Feuerungen nicht nur um Erstmessungen nach der Inbetriebnahme, sondern auch um wiederkehrend gemessene Anlagen der verarbeitenden Industrie (vgl. Kapitel 5.1). Außerdem wurden bei den handbeschickten Anlagen nicht nur stückiges Holz verwendet, sondern auch – vor allem in gewerblichen Anlagen – sonstige nicht-stückige Brennstoffe. Anlagen, die ausschließlich mit Stückholz betrieben werden, schneiden mit nur 17 % Beanstandungsquote besser ab (vgl. hierzu Abb. 26).

Bei den 42 Anlagen, die mit einem Vorofen ausgestattet waren, konnten keine Auffälligkeiten beobachtet werden. Von diesen Anlagen wurden 10 Feuerstätten beanstandet, das entspricht einem Anteil von 24 % und liegt etwas über dem Gesamtdurchschnitt.

Herstellerbezogene Auswertungen. Die Beanstandungsquote lässt sich kaum für die einzelnen Feuerungstypen verlässlich berechnen, zumal die Anzahl der beteiligten Hersteller mit 47 besonders hoch war und die Zahl der Bauarten und Feuerungstypen nochmals deutlich darüber lag. Wegen der geringen Anzahl von Daten je Feuerungstyp ist eine gesicherte Aussage hierzu nicht möglich und sinnvoll.

Baujahr. Bei jüngeren und damit technologisch ausgereifteren Anlagen ist ein deutlicher Trend zu geringeren Beanstandungsquoten festzustellen (Abb. 24). Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde das Baujahr bei der Auswertung in 3-Jahres-Zeiträume zusammengefasst. Dabei schneiden die ältesten Anlagen (vor 1986) mit einer Beanstandungsquote für Staub von 63 % am schlechtesten ab. Allerdings ist die Anlagenanzahl in dieser Altersgruppe für belastbare Aussagen eher gering. Bei den neueren Baujahren setzt sich der Trend zu weiteren Verbesserungen nicht weiter fort. Diese Beobachtung wird auch durch wesentlich umfangreichere Datenauswertungen des Kaminkehrerhandwerks zumindest für die Messungen von 2001 bis 2002 gestützt /5/.

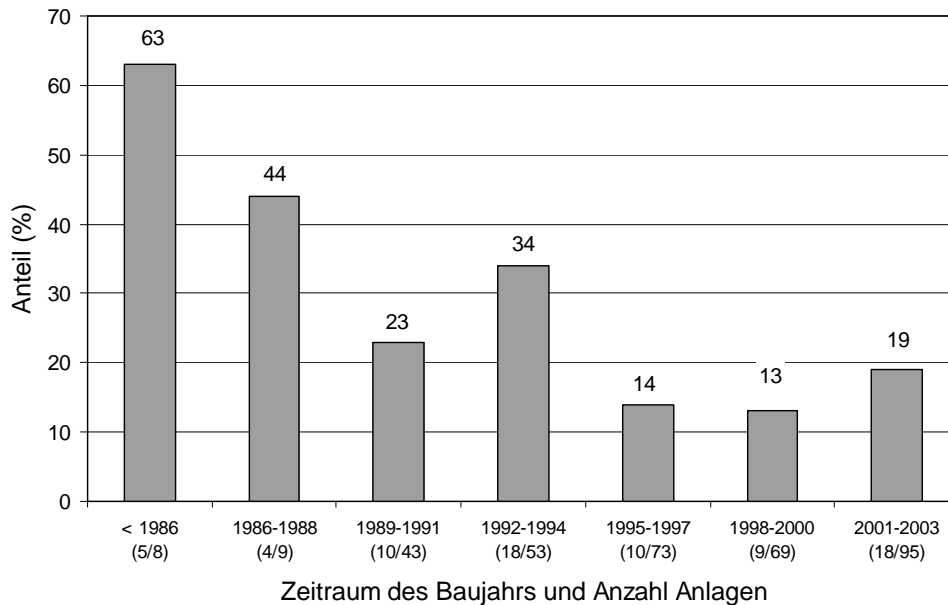


Abb. 24 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen bei den verschiedenen Anlagen-Baujahren der untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Nennwärmeleistung. Zur Beurteilung von Auffälligkeiten bei den einzelnen Leistungsklassen wurden die untersuchten Anlagen entsprechend den Emissions-Grenzwertabstufungen der 1. BImSchV gruppiert (Abb. 25). Hierbei fielen die wenigen – nicht messpflichtigen – Anlagen bis 15 kW Nennwärmeleistung positiv auf, wobei es sich um freiwillige Messungen an Pelletkesseln handelte. Wegen der geringen Anlagenanzahl und der besonderen Brennstoffart sollten hierzu jedoch keine Schlussfolgerungen gezogen werden. Ähnliches gilt für den Leistungsbereich von 500 bis 1000 kW.

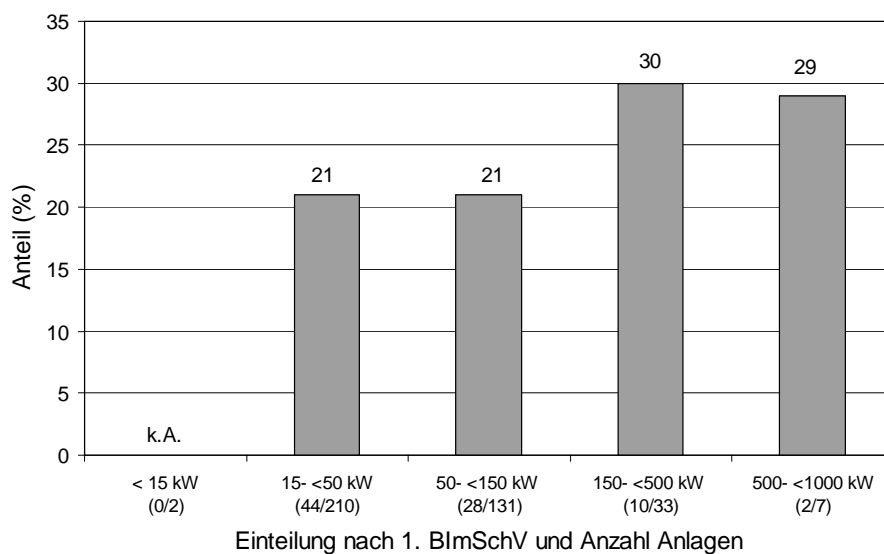


Abb. 25 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen bei den verschiedenen Anlagenleistungen der untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Generell ist festzustellen, dass bei Anlagen mit größerer Leistungen die Beanstandungsquote nicht sinkt sondern eher ansteigt. Das hängt u.a. damit zusammen, dass bei den größeren Anlagen die mechanische Beschickungsart überwiegt. Bei automatisch beschickten Hackschnitzelfeuerungen ist das Niveau der Gesamtstaub-Emission auch bei Prüfstandsmessungen (z. B. im Rahmen von Typenprüfungen) höher, als bei handbeschickten Zentralheizungskesseln oder Pelletkesseln /4/.

Brennstoffart. Die Art des verwendeten Brennstoffs ist offenbar von großer Bedeutung für die Beanstandungshäufigkeit bei den Staubemissionen. Am nachteiligsten erwies sich die Verwendung von Schleifstaub und Spanplatten als Brennstoff, während Anlagen in denen Holzpellets eingesetzt wurden, wie erwartet die geringste Beanstandungsquote aufwiesen (Abb. 26). Allerdings wurden die Brennstoffe in den untersuchten Anlagen zum Teil in Gemischen verwendet, so dass eine Beurteilung der Brennstoffeffekte schwierig ist.

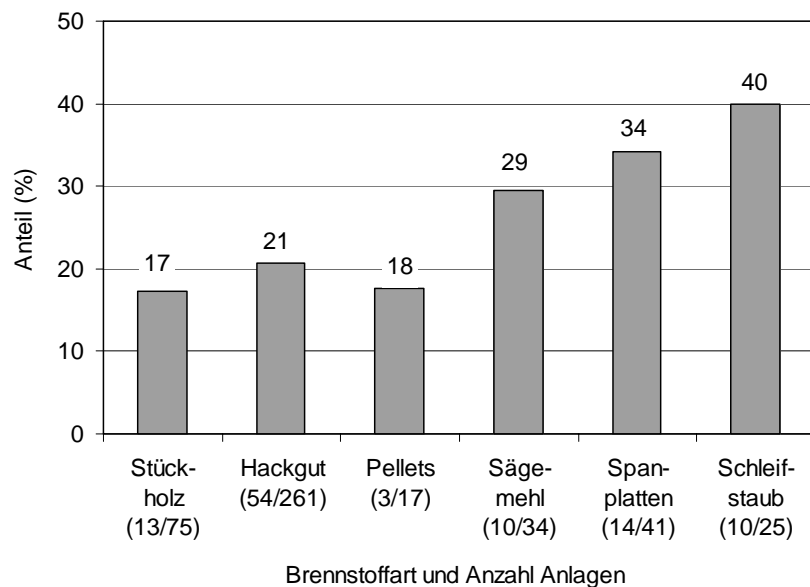


Abb. 26 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen je nach verwendeter Brennstoffart bei den untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen

Pufferspeicher. Im Wärme- oder Pufferspeicher wird die überschüssige, momentan nicht benötigte Leistung einer Feuerung zwischengespeichert. Außerdem führt das Vorhandensein eines Wärmespeichers zu vorteilhaften Verbrennungsbedingungen, da die Feuerung über einen größeren Zeitraum in einem für sie günstigeren Lastzustand betrieben werden kann und auch die ungünstigen Anheizphasen minimiert werden. Diese Verbesserungen sollten allerdings zum Zeitpunkt der Kaminkehrermessung nicht messbar sein, da die Anlage für diesen Zweck – außer bei sogenannten "teillastfähigen" Scheitholz-kesseln, die ohne Pufferspeicher betrieben werden, vgl. §6 (3), 1. BImSchV /2/) – während der Messdauer im Nennwärmeleistungszustand zu betreiben ist, wobei eine Abfuhr der Wärme gewährleistet sein muss.

Wegen der geringeren Lastvariabilität und der nicht gegebenen Schnellabschaltmöglichkeit ist ein Wärmespeicher vor allem für Scheitholz-kessel von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund wurden die Angaben in den Fragebögen nur für diese Bauartengruppen

pe ausgewertet. Hierbei kommt es nicht auf die absolute Größe des Pufferspeichers an, sondern vielmehr auf das spezifische Speichervolumen, d.h. auf das Verhältnis des Füllvolumens zur Nennwärmeleistung der Feuerung. Dieses spezifische Speichervolumen konnte aus den Angaben in den Fragebögen in den meisten Fällen errechnet werden.

Die Häufigkeiten von Beanstandungen je nach Speichervolumen wurden für handbeschickte Feuerungen für die Messgrößen Gesamtstaub und Kohlenmonoxid separat ausgewertet und sind in Abb. 27 bzw. Abb. 28 dargestellt. Es ergibt sich zunächst ein eindeutiger Vorteil für alle Anlagen, die über einen Pufferspeicher verfügen, was immerhin bei 13 handbeschickten Anlagen nicht der Fall war. Die Verwendung eines Pufferspeichers führt hier in etwa zu einer Halbierung der Beanstandungsquote (vgl. rechten Teil der Grafiken in Abb. 27 bzw. Abb. 28).

Bei handbeschickten Feuerungen wirkt sich ein größeres spezifisches Pufferspeichervolumen generell vorteilhaft auf die Beanstandungsquote für Gesamtstaub und CO aus. Beim Kohlenmonoxid ist dieser Vorteil noch stärker ausgeprägt als beim Staub. Die Ursachen für diese Beobachtungen sind allerdings nicht offensichtlich, da ja in allen Fällen (kurzzeitig) bei Nennwärmeleistung gemessen wird. Allerdings ist das Erreichen der Nennwärmeleistung in der Messpraxis nicht immer konstant möglich (insbesondere in Zeiten geringer Wärmeabnahme), so dass das Vorhandensein eines Pufferspeichers für die Einstellung günstiger Messbedingungen hilfreich ist. Hinzu kommt, dass der Einbau eines größeren Pufferspeichers auf eine sorgfältige Einbindung in das Energiesystem schließen lässt, was sich unter Umständen indirekt positiv auf die Messungen ausgewirkt haben könnte.

Die im Vergleich zum Staub etwas höhere Beanstandungsquote beim Kohlenmonoxid ist bei den handbeschickten Feuerungen durch die Tatsache zu erklären, dass es sich bei den Feuerungen zum Teil um Anlagen mit mehr als 50 kW Nennwärmeleistung und um Betreiber im Bereich der Holzverarbeitung handelt, bei denen ein strengerer Grenzwert gilt.

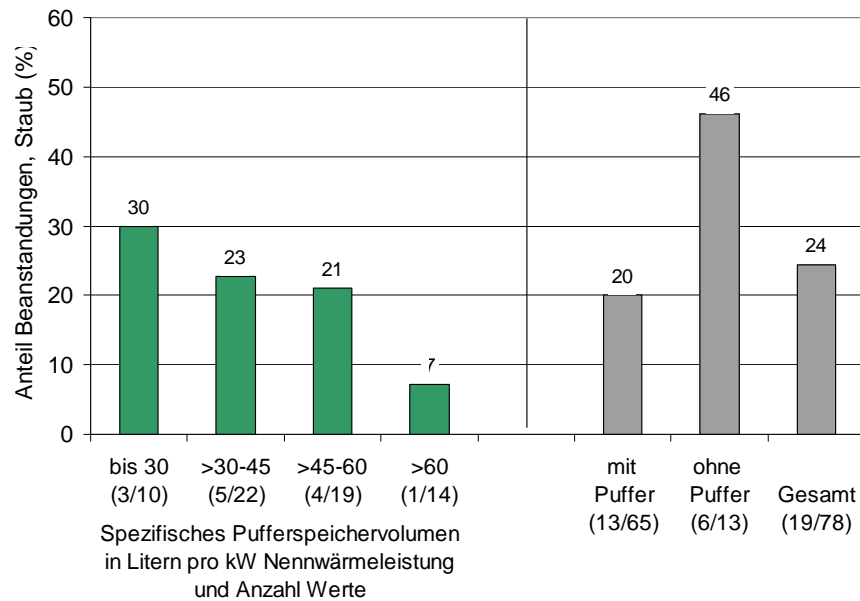


Abb. 27 Häufigkeit von Staub-Bearstandungen bei handbeschickten Holzfeuerungsanlagen mit verschiedenen spezifischen Pufferspeichervolumina (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

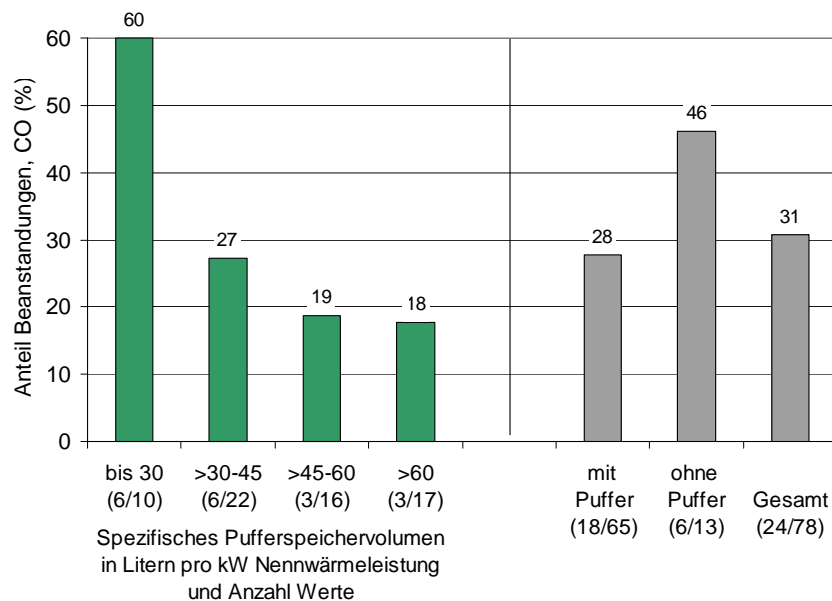


Abb. 28 Häufigkeit von Kohlenmonoxid(CO)-Bearstandungen bei handbeschickten Holzfeuerungsanlagen mit verschiedenen spezifischen Pufferspeichervolumina (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Bei den automatisch beschickten Feuerungen stellt die Nutzung eines Wärmespeichers eine Ausnahme dar, nur 12 % der Anlagen werden mit Pufferspeicher betrieben. Der Datenbestand aus der Erhebung ist somit sehr gering, so dass belastbare Auswertungen hierzu nicht möglich sind. Die nachfolgenden Darstellungen sind daher vorsichtig zu interpretieren.

Bei den Staubbeanstandungen zeigt sich für die automatisch beschickten Anlagen keine positive Wirkung bei einem Betrieb mit Wärmespeicher. Erst bei einem spezifischen Wärmespeichervolumen von mehr als 20 Litern pro kW Nennwärmeleistung sinkt die Beanstandungsquote leicht ab (Abb. 29). Allerdings ist die Anzahl der Werte mit insgesamt nur 37 Wärmespeicheranlagen sehr gering, so dass zufällige Wirkungen möglich sind.

Die Vergrößerung des spezifischen Wärmespeichervolumens führt bei den CO-Beanstandungen zu größeren positiven Effekten als beim Staub. Wie beim Staub zeigt sich aber auch bei den CO-Beanstandungen der automatisch beschickten Anlagen keine positive Wirkung für den Betrieb mit einem Wärmespeicher gegenüber dem speicherlosen Betrieb (Abb. 30). Nach den Daten der Erhebung kam es sogar zu einem Anstieg der Beanstandungsquote, wenn ein Speicher eingebaut worden war. Auch hier können zufällige Effekte auf Grund der geringen Datenbasis vorliegen.

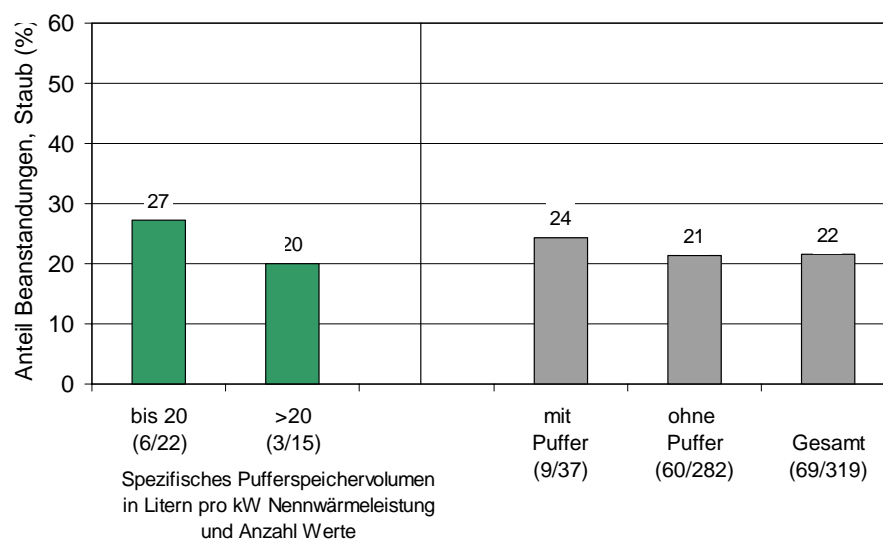


Abb. 29 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen bei automatisch beschickten Holzfeuerungsanlagen mit verschiedenen spezifischen Pufferspeichervolumina (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

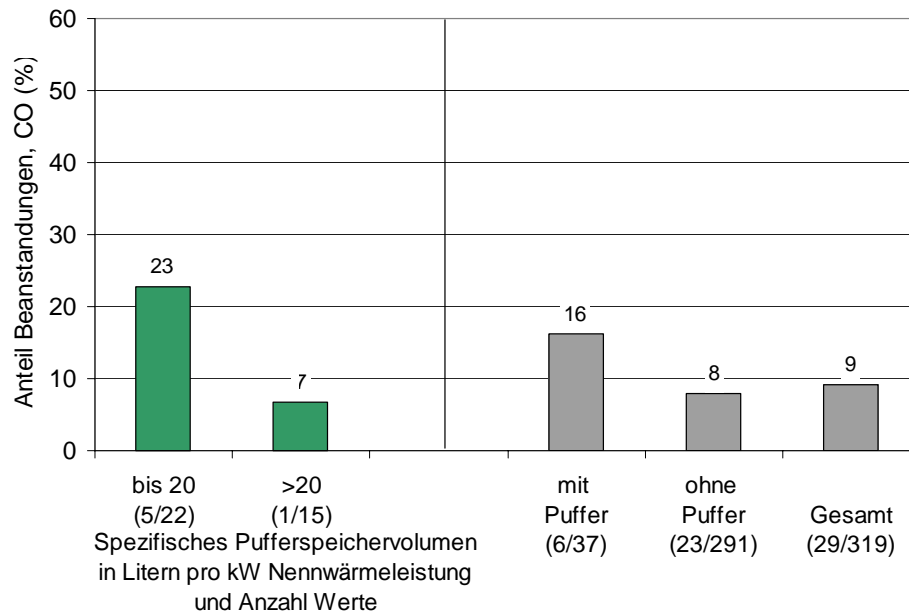


Abb. 30 Häufigkeit von Kohlenmonoxid(CO)-Beanstandungen bei automatisch beschickten Holzfeuerungsanlagen mit verschiedenen spezifischen Pufferspeichervolumina (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Gewerbliche Anlagen. Anlagen, die Energie für gewerbliche Zwecke bereitstellen, waren zu einem erhöhten Anteil (27 %) wegen überhöhten Staubausstößes beanstandet worden, als der Durchschnitt aller Anlagen (22,2 %). Als Grund hierfür ist anzuführen, dass in gewerblichen Anwendungen häufig qualitativ geringerwertige Brennstoffe zum Einsatz kommen. Das gilt offenbar insbesondere für Schreinereien, bei denen die Beanstandungen mit 33 % (16 von 49) besonders auffällig waren. Häufig ist die Betreuung und Wartung bei gewerblichen Anlagen auch weniger intensiv, als bei privaten Betreibern.

Rauchrohlänge. Zur besseren Übersichtlichkeit, wurden die Rauchrohlängen in äquidistante Klassen eingeteilt und ausgewertet (Abb. 31). Am besten schnitten die Anlagen mit längeren Rauchrohren ab, allerdings ist die Anzahl Anlagen hier gering, so dass diese Ergebnisse nur begrenzt aussagefähig sind.

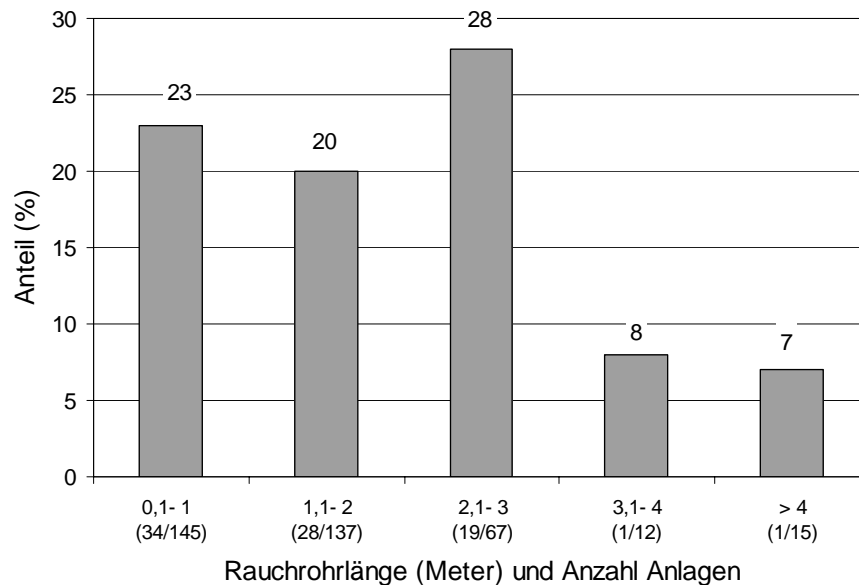


Abb. 31 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen je nach Rauchrohlänge bei den untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Rauchrohrquerschnitt. Beim Rauchrohrquerschnitt zeigt sich, dass größere Anlagenleistungen (mit entsprechend größeren Rauchrohrdurchmessern) hier häufiger beanstandet wurden, als kleinere Anlagen. Das zeigt Abb. 32. Die Gründe hierfür wurden bereits bei der Anlagenleistung erläutert (vgl. Abb. 25).

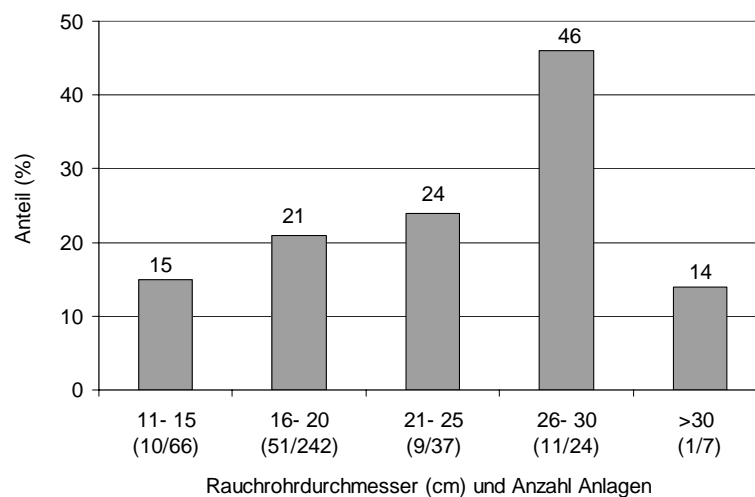


Abb. 32 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen je nach Rauchrohrquerschnitt bei den untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen (Zahlen in Klammern: Anzahl beanstandet / Anzahl in der Gruppe)

Umlenkungen und Winkel. Die Anzahl Bögen und deren Umlenkungswinkel sind im Einbauzustand sehr vielfältig, und die Bauteile werden in der Praxis auf sehr unterschiedliche Art miteinander kombiniert. Deshalb sind Aussagen über dieses Anlagenmerkmal nur schwer zu treffen. Allenfalls ist bei den Staubmesswerten ein leichter negativer Trend zu erkennen, wenn die Anzahl der 90°-Bögen im Abgasweg

besonders groß ist. Das zeigt Abb. 33. Eine größere Anzahl von Bögen deutet aber auch auf schwierige Einbaubedingungen hin, so dass nicht zwangsläufig die Anzahl Bögen selbst, sondern auch die dadurch bedingten nicht-optimalen Betriebs- und Wartungsbedingungen als Ursache in Frage kommen. Kombinationen von unterschiedlichen Winkeln wurden hier nicht ausgewertet.

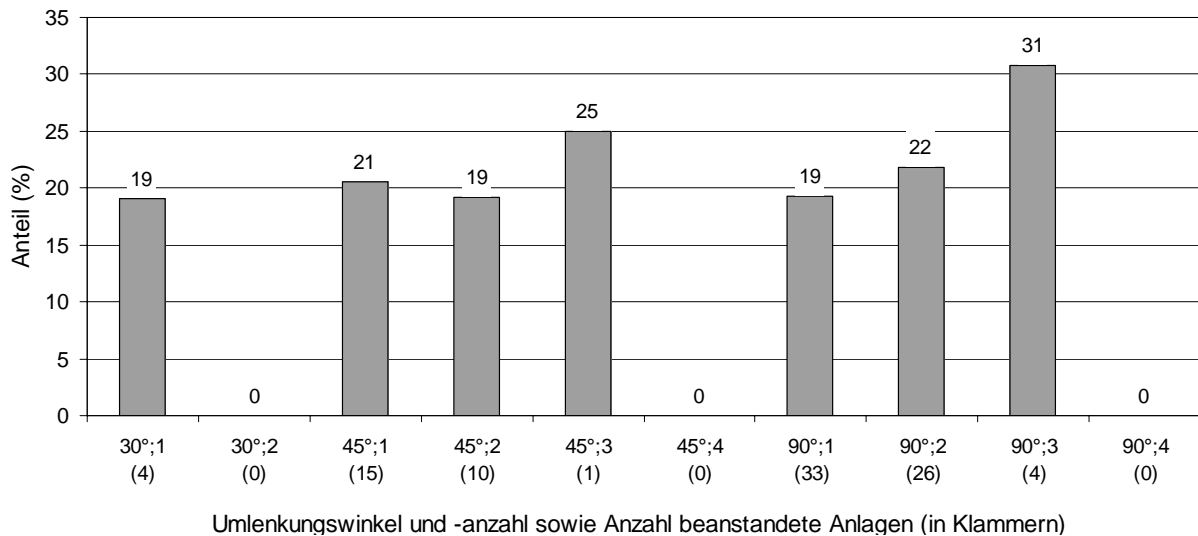


Abb. 33 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen je nach Umlenkungswinkel und -anzahl im Abgasweg bei den untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen

Rauchrohrführung. Das Rauchrohr verbindet die Feuerung mit dem Kamin. Es kann schräg, waagrecht oder senkrecht geführt werden, wobei auch Kombinationen dieser Möglichkeiten vorkommen, wenn mehrere Bögen verwendet werden müssen. In der vorliegenden Erhebung wurde allerdings nur die Lage des Rauchrohres im Bereich der Messöffnung erfasst. Dabei zeigt sich, dass die schräge Rauchrohrführung gegenüber einer waagerechten oder einer senkrechten Position im Vorteil war (Abb. 34). Eine Interpretation dieser Beobachtung ist allerdings derzeit noch nicht möglich.

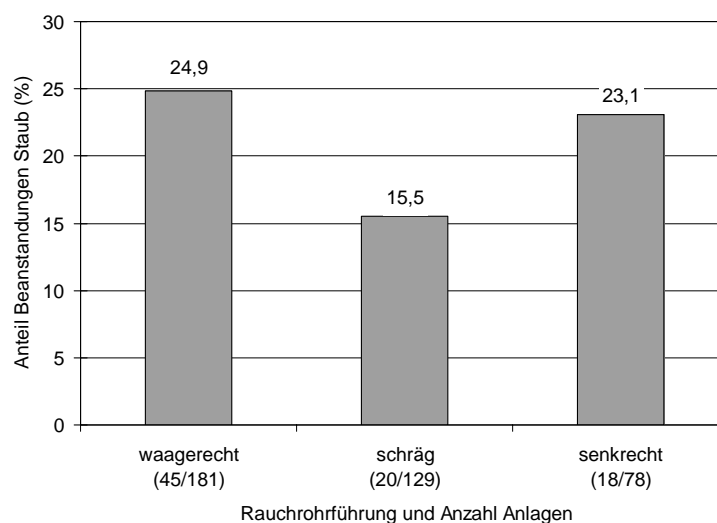


Abb. 34 Häufigkeit von Staub-Beanstandungen je nach Rauchrohrführung bei den untersuchten hand- und mechanisch beschickten Anlagen

Nebenlufteinrichtung. Beim Vorhandensein einer Nebenlufteinrichtung kam es in der Erhebung zu einer etwas geringeren Staub-Bearstandungsquote als beim Fehlen dieser Einrichtung (Abb. 35). Hier wirkt sich aus, dass die Begrenzung des Kaminzugs zu einer Minderung der Abgasgeschwindigkeit in der Feuerstätte bis zur Nebenlufteinrichtung führt, wodurch eine verbesserte Sedimentation von Partikeln eintreten kann bzw. das Austragen von Glutbettasche reduziert wird.

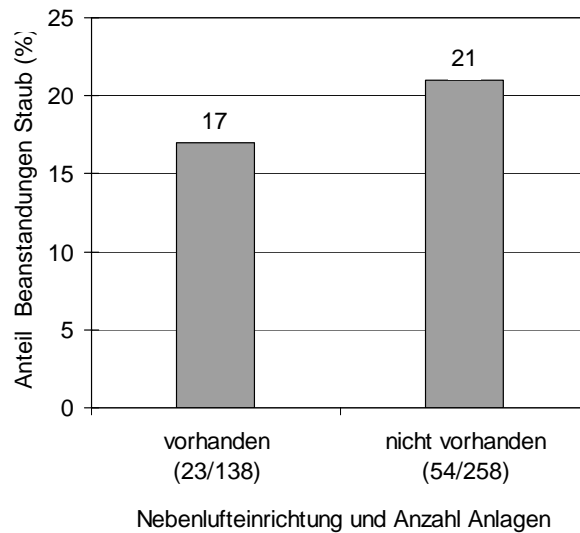


Abb. 35 Häufigkeit von Staub-Bearstandungen bei Abgassystemen mit oder ohne Nebenlufteinrichtung

Letzter Service (Kundendienst). Der Erfolg eines Wartungseingriffes durch den Kundendienst der Herstellerfirma lässt sich in Abb. 36 ablesen. Anlagen, die erst innerhalb der letzten 120 Tage vor der Emissionsmessung neu eingestellt worden waren, lagen mit nur 10 % Staub-Bearstandungsquote deutlich unter dem Durchschnitt. Hierunter fallen allerdings auch einige Anlagen, die nach einer Beanstandung erneut untersucht worden waren.

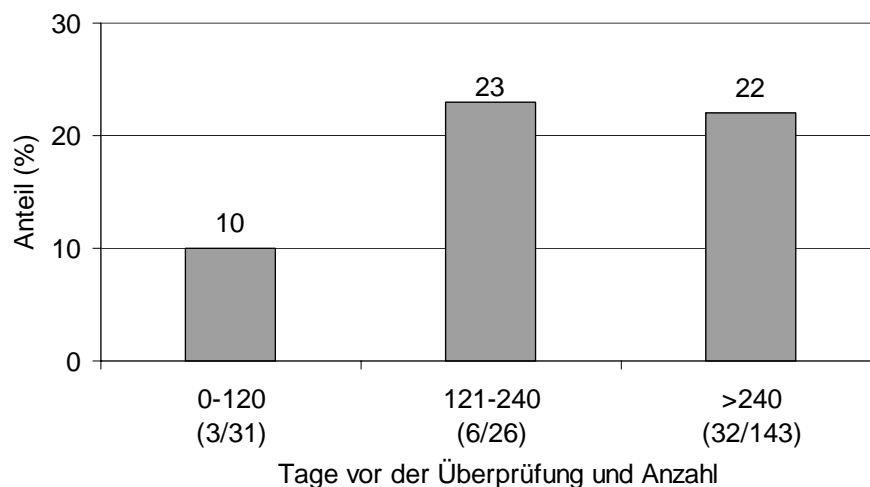


Abb. 36 Häufigkeit von Staub-Bearstandungen bei unterschiedlichen Zeitspannen seit dem letzten Kundendiensteingriff (Service)

6 Zusammenfassung

Eine Beurteilung der "Staubsicherheit" einer Feuerungsanlage durch den Kaminkehrer oder durch den Kundendienst ist derzeit nicht unmittelbar vor Ort möglich, sondern erfolgt mit einem zeitlichen Verzug von zum Teil mehreren Wochen. Ein neuartiges Messverfahren (Differenzdruckverfahren) könnte hier Abhilfe schaffen und zu einer Beschleunigung sowie eventuell zu einer Verbilligung der Überprüfung führen. Bei diesem Verfahren wird der mit zunehmender Filterverschmutzung beobachtete Anstieg des Differenzdrucks über dem Filter einer Staubmesssonde gemessen ("Delta-p-Methode"). Die in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 15 Minuten) gemessene Druckdifferenz kann auf eine mögliche Überschreitung der Emissionsbegrenzung für Staub hinweisen.

Für den vorliegenden Feldversuch wurden vier Messgeräte-Prototypen von der Firma Wöhler (Bad Wünnenberg) entwickelt und bereitgestellt. Die Geräte wurden in insgesamt 28 Kaminkehrbezirken in Niederbayern und Unterfranken in insgesamt 363 Messungen an zufällig ausgewählten Anlagen im Rahmen der Überprüfung von handbeschickten und automatisch beschickten Holzfeuerungen eingesetzt. Die neben dem Differenzdruck zugleich erfassen Messdaten für Staub und CO werden in Kapitel 4 ausgewertet. Daneben wurden von den Kaminkehrern weitere standort- und anlagenbezogene Daten im Rahmen eines vor Ort ausgefüllten Fragebogens erfasst. Die Auswertungen und Beobachtungen zum Anlagenbestand und zu den Ursachen für Staubgrenzwertüberschreitungen werden in Kapitel 5 zusammengestellt.

Delta-p-Auswertung. Anders als im Vorläuferprojekt zum Delta-p-Verfahren /3/, in dem die beiden Messverfahren unter standardisierten Bedingungen (Feuerungsprüfstand) eingesetzt worden waren, ist die Korrelation der Messwerte Druckdifferenz und Staubgehalt im vorliegenden Praxisversuch wesentlich geringer. Um dennoch aus dem Datenmaterial einen geeigneten Differenzdruck-Schwellenwert zur Erkennung "staubsicherer" Feuerungen herauszulesen, wurde eine Analyse der Wahrscheinlichkeit einer Falschbeurteilung bei veränderlichen Schwellenwerten durchgeführt. Diese Analyse zeigt, dass das Optimum für den Schwellenwert bei 24 hPa liegt.

Bei diesem Wert müssten nur noch 47 % (143 von 306) aller Staubmesswerte gravimetrisch überprüft werden. Ca. 96 % (157 von 163) aller unterhalb des Staubgrenzwertes liegenden Messwerte würden auch tatsächlich als "staubsicherer" erkannt; nur 3,7 % blieben von der Delta-p-Methode unerkannt. 78,3 Prozent (112 von 143) der über das Delta-p-Verfahren beanstandeten Messwerte würden "unnötigerweise" gravimetrisch überprüft werden. Unter realen Bedingungen erhalte man aber für 53 % aller Staubmessungen, die nicht bereits durch eine CO-Grenzwertüberschreitung beanstandet werden, eine Sofortbewertung.

Die vorliegende Datenbasis legt nahe, dass eine solche "Sofortbewertung" von Staubmesswerten anhand des vor Ort ablesbaren Differenzdrucks (Delta-p-Messwert) erfolgen könnte, so dass nur noch ein Teil der in der Praxis (im gleichen Gerät) verwendeten Filterhülsen zur gravimetrischen Auswertung eingeschickt werden müsste. Eine direkte

Umrechnung der Differenzdruckmessung in eine tatsächliche äquivalente Massenbelastung, d. h. in einen Staubmesswert, ist dagegen nicht möglich; eine solche Zielsetzung wurde im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung auch nicht verfolgt.

Anlagenbezogene Auswertungen (Fragebogen). Die statistische Auswertung der erhobenen anlagenbezogenen Daten zeigt ein heterogenes Bild. Die 397 untersuchten Anlagen stammten von 47 verschiedenen Herstellern, bei denen die Firmen Hargassner, Fröling (Österreich) und HDG am häufigsten vertreten waren. Zwanzig Prozent der untersuchten Anlagen waren handbeschickt (Erstmessungen). Die älteste untersuchte Anlage stammte aus dem Jahr 1974, allerdings waren 95 % aller Anlagen nach 1989 gebaut worden. Neuere Anlagen wurden tendenziell weniger häufig beanstandet als ältere.

Bei den handbeschickten Anlagen war ein Pufferspeicher in 83 % der Fälle vorhanden. Je größer dieser Wärmespeicher dimensioniert war (in Litern je kW), umso seltener kam es zu Beanstandungen wegen Staub- oder CO-Grenzwertüberschreitungen. Beispielsweise waren Anlagen mit einem Speicher von maximal nur 30 l/kW in 30 % der Fälle wegen Staub beanstandet worden, während diese Quote bei größeren Speichervolumina von mehr als 60 l/kW auf nur noch 7 % absinkt. Für Hackschnitzelfeuerungen wurde eine solche Beobachtung allerdings nicht gemacht; Wärmespeicher waren hier aber auch mit nur 12 % der Fälle eher eine Ausnahme.

Gewerbliche Anlagen waren zu einem größeren Anteil beanstandet worden als private Zentralheizungsanlagen. Geringere Beanstandungsquoten wiesen Anlagen mit schräger Rauchrohrführung auf, verglichen mit senkrechten oder waagerechten Rauchrohrenbauten. Das Vorhandensein einer Nebenlufteinrichtung wirkte sich ebenfalls positiv auf die Staubbeanstandungsquote aus (17 %), während die Anlagen ohne eine solche Nebenlufteinrichtung, die mit ca. zwei Dritteln aller Anlagen die Mehrheit darstellten, in 21 % der Fälle beanstandet wurden. Als vorteilhaft erwies es sich auch, wenn der letzte Kundendiensteingriff weniger als 60 Tage zurücklag.

Neben den genannten Zusammenhängen zwischen der Beanstandungsquote und der Häufigkeit bestimmter Anlagenmerkmale wurde eine Vielzahl weiterer statistischer Auswertungen zu bestimmten anlagentechnischen Gegebenheiten durchgeführt und in Kapitel 5 dargestellt.

7 Quellenverzeichnis

- /1/ Ester, S.: Interne Firmenunterlagen der Fa. Wöhler MGKG GmbH, Schützenstraße 38, D-33181 Bad Wünnenberg
- /2/ Feldhaus, G. Hansel, H.D. (Bearb.): Bundes-Immissionsschutzgesetz. 11. Auflage. Heidelberg, C.F. Müller Verlag, 1997, 646 S.
- /3/ Hartmann, H., Schmid, V., Link, H.; Ester, S. (2001): Senkung des Messaufwandes bei der Ermittlung der Staubemissionen aus Holz-Kleinfeuerungsanlagen. Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU), München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising, Oktober 2001, 42 S.
- /4/ Hartmann, H.; Höldrich, A.: Wirkungsgrad, Emissionen, Aschequalität. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2003, S. 103-126.
- /5/ Wazula, H. (2003): Emissionsergebnisse aus der Überwachung von Holz-Kleinfeuerungsanlagen. In: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Veranst.): Anforderungen an Holz-Kleinfeuerungsanlagen bei der Novellierung der 1. BImSchV, Fachtagung am 10.12.2003 in Augsburg, Tagungsband, S. 31-45.
- /6/ Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, Bad Wünnenberg, Bedienungsanleitung Staubmessgerät SM 96-CO.