UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 299 44 140
UBA-FB 000477

Texte
41/03
ISSN
0722-186X

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung

von

Dr.-Ing. Michael Struschka
Dr.-Ing. Ulrich Zuberbühler
Dipl.-Ing. Anja Dreiseidler
Dipl.-Ing. Daniel Dreizler
Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Universität Stuttgart

und

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

Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von 10,00 €
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: http://www.umweltbundesamt.de

Redaktion: Fachgebiet III 2.2
Volker Weiss

Berlin, Juli 2003

1. Berichtsnummer UBA-FB 299 44 140	2.	3.

4. Titel des Berichts

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung

5. Autoren

M. Struschka, U. Zuberbühler, A. Dreiseidler, D. Dreizler, G. Baumbach sowie H. Hartmann, V. Schmid, H. Link

6. Durchführende Institution

Universität Stuttgart
Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)
Pfaffenwaldring 23
70550 Stuttgart

7. Fördernde Institution

Umweltbundesamt
Fachgebiet III 2.2
Postfach 33 00 22
14191 Berlin

8. Abschlussdatum

Februar 2003

9. Veröffentlichungsdatum

10.UFOPLAN - Nr.

299 44 140

11. Seitenzahl

312

12. Literaturangaben

13. Tabellen und Diagramme

14. Abbildungen

15. Zusätzliche Angaben

16. Kurzfassung

In diesem Vorhaben wurden neue Emissionsfaktoren und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland ermittelt. Die Partikelemissionen wurden differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und der Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}.

Dazu wurden Partikelmessungen auf dem Prüfstand an Einzelfeuerstätten, Heizkesseln und Anlagen der Kleinverbraucher sowie an installierten Anlagen der Kleinverbraucher durchgeführt. Ergänzend wurden auch bisher durchgeführte eigene Untersuchungen verwendet und Literaturangaben ausgewertet. Außerdem wurde das Emissionsverhalten und die Partikelemissionen von Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern beim Einsatz von leichten Heizölen mit unterschiedlichen Schwefelgehalten und bei Zusatz eines ferrocenhaltigen Additivs auf dem Prüfstand untersucht. Bei den eigenen Untersuchungen wurde, soweit zutreffend, sowohl die filterbaren und als auch die kondensierbaren Anteile der Partikelemission ermittelt. Dies war z.B. bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe der Fall, wenn höhere Konzentrationen von organischen Verbindungen im Abgas enthalten waren. Ebenso wurde bei den Ölfeuerungen neben den filterbaren Partikeln auch der kondensierbare Anteil an der Partikelemission in Form von Schwefelsäure erfasst.

Das Emissionsaufkommen für Partikel wird im Jahr 2000 für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher im wesentlichen durch die Verbrennung von festen Brennstoffen in Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher im Geltungsbereich der 1. BImSchV bestimmt. Rund 94 % des berechneten Partikelaufkommens werden durch diese Feuerungen verursacht.

Bei den Feuerungen für Heizöl EL liegt der Anteil der Partikelfraktionen PM_1 und PM_{10} zwischen 88 und 100 % an der gesamten Partikelemission. Für feste Brennstoffe liegen die Anteile der Partikelfraktionen PM_1 und PM_{10} zwischen 64 und 99 %. Bei Einzelfeuerstätten sind die Anteile der Partikelfraktionen vor allem vom eingesetzten Brennstoff und nur wenig von den Verbrennungsbedingungen und der Gerätekonstruktion abhängig.

Die Anteile der Partikelfraktionen bei Ölfeuerungen hängen vom Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes und damit von der Schwefelsäurekonzentration im Abgas ab, die auch insgesamt die Höhe der Partikelemission wesentlich beeinflusst.

Bei hand- und mechanisch beschickten Holzkesseln wirken sich neben dem eingesetzten Brennstoff auch die Wärmeleistung und Abgasreinigungseinrichtungen (z.B. Gewebefilter) auf die Partikelverteilung aus. Durch den Einsatz eines Gewebefiltern konnte an einer modernen Unterschubfeuerung beim Betrieb mit Resthölzern eine Partikelminderung um über 90 % erreicht werden. Die Reduzierung des Schwefelgehaltes im leichten Heizöl auf 0,1 Massen-% führt durch geringere Schwefelsäurekonzentrationen im Abgas zu einer Minderung der Partikelemission in der Größenordnung von 30 %.

17. Schlagwörter

Heizöl, feste Brennstoffe, Steinkohlen, Braunkohlen, Holz, Emissionen, Emissionsaufkommen, Emissionsfaktoren, Energieverbrauch, Staub, Partikel, Schwefelsäure, Schwefeltrioxid, Additive, Ferrocen

18. Preis		

1. Report No. UBA-FB 299 44 140	2.	3.
4. Report Title Ascertainment and Assessment of Particulate Matter Emissions from Combustion Appliances in the Household and Small Consumer Sector and Outlook on Emission Reduction		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) M. Struschka, U. Zuberbühler, A. Dreiseidler, D. Dreizler, G. Baumbach and H. Hartmann, V. Schmid, H. Link		8. Report Date February 2003 9. Publication Date
6. Performing Organisation (Name, Address) University of Stuttgart Institute for Process Engineering and Power Plant Technology (IVD) Pfaffenwaldring 23 70550 Stuttgart		10.UFOPLAN - Nr. 299 44 140 11. No. of Pages 312
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Federal Environmental Agency Division III 2.2 PB 33 00 22 14191 Berlin		12. No. of References 13. No. of Tables, Diagrams 14. No. of Figures
15. Supplementary Notes		

16. Abstract

Subject of this project was to determine new emission factors and the actual emission load of particulate matter from combustion appliances for solid and liquid fuels used by households and small consumer sector in Germany. A difference for the emissions of particles was made between the total quantity of emitted particles and the particle fractions PM_1, $PM_{2,5}$, and PM_{10}.

For the investigation, particle measurements were taken at commercial stoves, boilers and appliances on the test rig and at installed appliances of small consumer sector. As a supplement, previously carried-out in-house investigations were utilised and data from literature evaluated. Additionally the emission behaviour and the emissions of particulate matter from boilers with oil burners were investigated on the test rig for the use of light fuel oils with differing sulphur contents and applying a ferrocene-containing additive. In the investigations, both the filterable and the condensable particle fractions of the emissions were ascertained for the substances concerned. It was the case for instance with combustion appliances for solid fuels when the exhausts contained higher concentrations of organic compounds. In the same way, the measurements at the oil-fired appliances besides the filterable particles comprised the condensable emission fraction in the form of sulphuric acid.

The emission load of particles in the year 2000 for the household and small consumer section is substantially determined by the combustion of solid fuels in combustion appliances within the scope of the 1st BImSchV (Ordinance on Small Furnaces). About 94 % of the calculated particle matter load originate from these firing systems. In the case of oil burners, the particle fractions PM_1 und PM_{10} amount to between 88 and 100 % of the total particulate matter emission. For solid fuels, the particle fractions PM_1 and PM_{10} range between 64 and 99 %. In the case of stoves the amount of the particle fractions depend on the utilised fuel above all and only little on the combustion conditions and the appliance construction.

The percentages of the particle fractions for oil-fired appliances depend on the sulphur content of the fuel and hence the sulphuric acid concentration in the exhaust gas, which also has a substantial impact on the total particle emission level.

In the case of manually and mechanically charged wood-fired boilers not only the fuel but also the heat output and the exhaust gas cleaning installations (e.g. fabric filter) affect the particle distribution. By installing a fabric filter in a modern underfeed firing system operating with waste wood a particle reduction of more than 90% could be achieved. The reduction of the sulphur content to 0.1 % by mass in light fuel oil results in a reduced emission of particles in the order of magnitude of 30% through lower sulphuric acid concentrations in the exhaust gas.

17. Keywords

light fuel oil, solid fuels, wood, emissions, emission load, emission factors, energy consumption, particulate matter, PM1, PM2,5, PM10, sulphuric acid, sulphur trioxide, additives, ferrocene

18. Price		

Inhaltsverzeichnis

Berichtsteil: Emissionsfaktoren und Emissionsaufkommen

Seite

1 Einleitung ... 1

2 Definition von Partikeln ... 3

3 Vorgehensweise ... 5

4 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen ... 9

4.1 Struktur der in Haushalten installierten Feuerungen ... 11

4.2 Struktur der bei Kleinverbrauchern installierten Feuerungen ... 13

5 Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher ... 17

5.1 Emissionsrelevanter Endenergieverbrauch ... 18

5.2 Gerätebezogener Energieverbrauch der Feuerungsanlagen ... 20

6 Ermittlung der Emissionsfaktoren ... 30

6.1 Differenzierung der Emissionsfaktoren ... 31

6.2 Berechnung der Emissionsfaktoren für Partikel ... 33

6.3 Emissionsfaktoren für Partikel ... 35

6.4 Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x ... 38

7 Berechnung des Emissionsaufkommens ... 42

8 Minderungspotential und Prognose der Emissionsentwicklung ... 46

8.1 Prognose der Emissionsentwicklung ... 48

9 Zusammenfassung ... 54

10 Literatur ... 56

Anhang A - Gerätebezogener Endenergieverbrauch (D) ... 58

Anhang B - Gerätebezogene Emissionsfaktoren und -aufkommen ... 62

Anhang C – Sektorales Emissionsaufkommen ... 95

Anhang D - Bewertung der ermittelten Emissionsfaktoren ... 101

Berichtsteil: Messberichte

Seite

Aufgabenstellung und Messprogramm **103**

Qualitätssicherung **105**

Literatur **108**

Teil I: Einzelfeuerstätten **109**

Teil II: Heizölkessel **150**

Teil III: Heizkessel für Holzbrennstoffe **201**

Teil IV: Anlagen der Kleinverbraucher **277**

1 Einleitung

In neuen Luftqualitätsrichtlinien des Rates der Europäischen Union sind erstmalig Grenzwerte für Feinstäube mit Partikelgrößen bis 10 µm (PM_{10}) in der Außenluft enthalten. Längerfristig ist damit zu rechnen, dass auch Partikel bis 2,5 µm ($PM_{2,5}$) limitiert werden. Bei der Festlegung der Grenzwerte für PM_{10} stützt sich die EU-Kommission auf Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Diese hat, aufgrund von zahlreichen epidemiologischen Studien, einen Zusammenhang zwischen der Feinstaubkonzentration in der Außenluft und dem Risiko von Atemwegserkrankungen und daraus resultierender Todesfälle erkannt. Um sich organischer und anorganischer Partikel zu erwehren, besitzt der menschliche Organismus mechanische, zelluläre und biochemische Abwehrmechanismen. Eine Überlastung dieser Mechanismen durch z.B. hohe Partikelkonzentrationen, langfristige Exposition, Partikel mit toxischen oder krebserregenden Eigenschaften sowie sehr feine Partikel, die tief in die Lunge eindringen, kann zu entzündlichen oder allergischen Reaktionen des Körpers führen, die letztendlich in Krankheitsbildern münden.

Aufgrund der anstehenden Umsetzung der europäischen Luftqualitätsrichtlinien in nationales Recht wurde in Deutschland die Immissionssituation untersucht und festgestellt, dass bei den geforderten Grenzwerten sowohl räumlich als auch zeitlich mit Überschreitungen gerechnet werden muss. Zur Ermittlung und Bewertung möglicher Feinstaubquellen werden derzeit in Deutschland zahlreiche Forschungsvorhaben durchgeführt.

Zur Erzeugung von Raum- und Prozesswärme sowie zur Brauchwassererwärmung bei Haushalten und Kleinverbrauchern werden derzeit vor allem gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe eingesetzt. Hierbei wird neben Erdgas vor allem leichtes Heizöl (Heizöl EL) in Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV verbrannt. Feste Brennstoffe tragen nur zu einem geringen Anteil zur Energieversorgung in diesen Bereichen bei. Am Emissionsaufkommen sind die verschiedenen Energieträger allerdings sehr unterschiedlich beteiligt. So tragen feste Brennstoffe trotz des geringen Anteils am Endenergieverbrauch überwiegend zum Emissionsaufkommen an Produkten unvollständiger Verbrennung (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel) bei. Nach vorläufigen Schätzungen werden mit festen und flüssigen Brennstoffen betriebene Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher als eine der Hauptquellen für Feinstaub im Bereich der stationären Anlagen angesehen.

In diesem Vorhaben sollen deshalb neue Emissionsfaktoren und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland ermittelt werden. Die Partikelemissionen werden differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und der Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}. Dazu werden Partikelmessungen auf dem Prüfstand und an installierten Anlagen durchgeführt. Ergänzend sollen auch bisher durchgeführte eigene Untersuchungen verwendet und Literaturangaben ausgewertet werden.

An typischen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe der Haushalte sollen Messungen an Einzelfeuerstätten (Dauerbrandofen, Heizeinsatz für Kachelöfen, Kamineinsatz und Kaminofen) und Heizkesseln (zwei Stückholzkessel, Hackgutfeuerung und Kessel-Pelletfeuerung) durchgeführt werden, die mit Steinkohlen (Anthrazit und Steinkohlenbriketts), Braunkohlenbriketts (Rheinisches, Lausitzer, Mitteldeutsches und Böhmisches Revier) und Holzbrennstoffen (naturbelassenes stückiges Holz, Hackgut und Holzpreßlinge) betrieben werden. Stellvertretend für Feuerungen die im Bereich der Kleinverbraucher vorhanden sind, sollen eine Vorschubfeuerung und zwei Unterschubfeuerungen untersucht werden, die mit naturbelassenem Holz und Restholz befeuert werden.

Bei Einsatz von flüssigen Brennstoffen ist im Zuge der anstehenden Reduzierung des Schwefelgehaltes im leichten Heizöl (Heizöl EL) aufgrund europäischer Richtlinien der Einfluss des Schwefelgehaltes auf das Emissionsverhalten der Feuerungsanlagen und insbesondere auf die Höhe der Partikelemissionen von großem Interesse. Hierzu sollen das Emissionsverhalten und die Partikelemissionen von zwei Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern beim Einsatz von leichten Heizölen mit unterschiedlichen Schwefelgehalten und bei Zusatz eines ferrocenhaltigen Additivs auf dem Prüfstand untersucht werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zu anlagen-, brennstoff- und lastabhängigen Einflussgrößen auf die Partikelemissionen sollen dazu dienen, geeignete Maßnahmen zur Minderung der Partikelemissionen bzw. das Minderungspotential aufzuzeigen. Hieraus soll auch die zukünftige Emissionsentwicklung für den Haushalts- und Kleinverbraucherbereich abgeschätzt werden.

Der Endbericht zu diesem Vorhaben besteht aus zwei Teilen. Im Berichtsteil „Emissionsfaktoren und Emissionsaufkommen“ werden die Vorgehensweisen und die Ergebnisse für die Ermittlung der Emissionsfaktoren, des Emissionsaufkommens und der Emissionsprognosen beschrieben. Im Berichtsteil „Messberichte“ (Teil I: Einzelfeuerstätten; Teil II: Heizölkessel; Teil III: Holzkessel der Haushalte und Teil IV: Anlagen der Kleinverbraucher) ist die Durchführung der Messungen und eine Zusammenstellung der Messergebnisse enthalten.

2 Definition von Partikeln

Partikel sind kleine Teilchen, denen ein definiertes Volumen und eine Grenzfläche zugeordnet werden kann und die dispers in Erscheinung treten. Somit sind unter dem Begriff Partikel sowohl Feststoffpartikel als auch flüssige Tröpfchen oder Mischformen hiervon zu verstehen. Sind diese Partikel in einem Gas dispergiert, spricht man auch von Aerosolen (siehe auch VDI-Richtlinie 3491, 1980).

Partikel entstehen z.B. durch Abrieb, Zerkleinerung, Korrosion, Kondensation und Nukleation aus der Gasphase sowie durch unvollständige Verbrennung. Die jeweiligen Prozesse erzeugen typische Größenverteilungen der Partikel und Partikelstrukturen, die neben den Partikelbildungsmechanismen auch von sekundären Maßnahmen zur Emissionsminderung (z.B. Einsatz von filternden oder elektrischen Staubabscheidern) abhängig sind.

Die Feinstaubbelastung der Außenluft setzt sich aus direkt emittierten Partikeln (primäre Partikel) und aus sekundär gebildeten Anteilen zusammen. Diese sekundären Feinstäube entstehen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen durch chemische Umwandlung in der Atmosphäre. Primäre Partikel können definiert werden als Partikel die direkt von der Emissionsquelle in Partikelform emittiert werden und solche Stoffe, die unmittelbar nach Verlassen der Emissionsquelle in unmittelbarer Umgebung des Schornsteins als Partikel vorliegen. Somit können sich die Partikelemissionen einer Emissionsquelle aus einem filterbaren und einem kondensierbaren Anteil zusammensetzen (z.B. Hüglin (2000) und Corio et al., 2000).

Dies ist bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und ungünstigen Verbrennungsbedingungen der Fall, deren Abgase organische Verbindungen enthalten, welche bei Umgebungstemperatur kondensieren und dann in flüssiger oder fester Form vorliegen. Ebenso ist z.B. bei Ölfeuerungen zwischen filterbaren und kondensierbaren Anteilen an den Partikelemissionen zu unterscheiden, wenn Schwefelverbindungen im Brennstoff enthalten sind. Denn ein geringer Teil des Brennstoffschwefels wird zu Schwefeltrioxid (SO_3) oxidiert, welches sich mit dem im Abgas vorhandenen Wasserdampf zu Schwefelsäure (H_2SO_4) umsetzt, die unterhalb des Schwefelsäuretaupunktes kondensiert.

Um sowohl die filterbaren als auch kondensierbaren Partikel bei den Einzelfeuerstätten und bei einem Stückholzkessel mit veralteter Verbrennungstechnik zu erfassen, erfolgte die Partikelprobenahme im verdünnten und abgekühlten Abgas. Somit können die im heißen Abgas aus filter- und kondensierbaren Anteile bestehenden Partikel im verdünnten Abgas gemeinsam in Form filterbarer Partikel abgeschieden werden.

Aufgrund der guten Verbrennungsbedingungen und den damit verbundenen geringen Partikelkonzentrationen würde bei den untersuchten Ölfeuerungen eine Verdünnung des Abgases zu unvertretbar langen Probenahmezeiten führen. Deshalb erfolgt hier die Probenahme zur Bestimmung der filterbaren Partikel im unverdünnten Abgas. Der kondensierbare Anteil der Partikelemission in Form von SO_3 (bzw. H_2SO_4) im Abgas wird durch die Messung der

H_2SO_4-Konzentration erfasst. Bei dieser Messung kann eine Fraktionierung der kondensierten Partikel nicht vorgenommen werden. Deshalb erfolgte in diesem Fall eine Berechnung der Partikelfraktionen PM_x anhand von Literaturangaben über die Größenverteilung von kondensierter Schwefelsäure in unmittelbarer Nähe einer Emissionsquelle.

Unter Partikelemission ist somit die insgesamt emittierte Partikelmasse einer Feuerung zu verstehen, die sich aus filterbaren und kondensierbaren Anteilen zusammensetzt. Die Begriffe „Partikelemission bzw. Partikelaufkommen" werden in diesem Bericht auch in dieser Definition gebraucht. Sind filter- bzw. kondensierbare Anteile der Partikelemission gemeint, werden diese auch entsprechend bezeichnet.

Die Partikelmasse wird über das eingesetzte Messverfahren (z.B. Probenahme, Art der Partikelabscheidung, eingesetzte Filtersubstrate, Auswerteverfahren) und dem Abgaszustand am Probenahmeort definiert. Dies mindert z.T. die Vergleichbarkeit von Literaturdaten, da unterschiedliche Messverfahren eingesetzt bzw. die Partikelprobenahme bei unterschiedlichen Abgaszuständen erfolgte. Um die Datenbasis für die Berechnung der Partikelemissionen nicht zu stark einzuschränken, wurden trotzdem alle vorliegenden Messwerte zur Ermittlung der Emissionsfaktoren verwendet.

Bei den eigenen Messungen wurde zur Bestimmung der Partikelkonzentration (filterbare Partikel) die gravimetrischen Verfahren mit Filterkopfgerät und Planfilter oder Hülsenfilter nach VDI-Richtlinie 2066 (VDI 2066, Blätter 1, 2 und 3) eingesetzt. Bei diesen Messverfahren erfolgt eine isokinetische Teilstromentnahme und eine Abscheidung der Partikel an einem Filtermedium. Die abgeschiedene Partikelmasse wird anschließend durch Wägung ermittelt. Die Partikelkonzentration im beprobten Gas ergibt sich aus der abgeschiedenen Partikelmasse und des entnommenen Gasvolumens. Als Filtermedien wurden bei den Messungen an Einzelfeuerstätten, den Heizölkesseln, den Anlagen der Kleinverbraucher und dem Stückholzkessel mit veralteter Verbrennungstechnik Planfilter eingesetzt. Die Probenahme bei den übrigen Holzkesseln der Haushalte wurde mit Hülsenfiltern durchgeführt.

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilungen der Partikelemissionen wurden Kaskadenimpaktoren verwendet. Zum einen der in der VDI-Richtlinie 2066 in Blatt 5 (VDI 2066, Blatt 5) beschriebene Impaktor vom Typ Mark III der Firma Andersen Instruments mit 8 Trennstufen und Endfilter und zum anderen ein Niederdruck-Impaktor vom Typ LPI 20 der Firma Dekati mit 13 Trennstufen ohne Endfilter. Bei beiden Probenahmegeräten erfolgt die Fraktionierung der Partikel nach dem Strömungstrennverfahren, indem die Gasströmung im Impaktor von Stufe zu Stufe beschleunigt und hierdurch immer feinere Partikel aus dem Gasstrom ausgetragen werden und auf Filtersubstraten impaktieren. Die auf den jeweiligen Trennstufen und ggf. dem Endfilter abgeschiedenen Partikelmassen werden gravimetrisch bestimmt. Die Partikelverteilung ergibt sich durch den prozentualen Anteil der Partikelmasse der Trennstufe bzw. des Endfilters bezogen auf die insgesamt im Impaktor abgeschiedene Partikelmasse.

3 Vorgehensweise

Bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens für Partikel aus Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV für feste und flüssige Brennstoffe bei Haushalten und Kleinverbrauchern wird im Grundsatz entsprechend dem abgeschlossenen Vorhaben "Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher" (Kurzbezeichnung: Emissionsfaktoren-Vorhaben, zitiert als Pfeiffer et al., 2000) vorgegangen.

Der Anwendungsbereich der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, 2001) erstreckt sich auf die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Feuerungsanlagen, die keiner Genehmigung nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bedürfen. Für alle in den Anwendungsbereich fallende Feuerungsanlagen sind u.a. in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff, der Bauart und der Nennwärmeleistung Anforderungen an den Betrieb dieser Feuerungsanlagen festgelegt. Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte bzw. Abgasverluste der Feuerungsanlagen wird, außer bei Öl- und Gasfeuerungen mit Feuerungswärmeleistungen über 10 MW, vom zuständigen Bezirksschornsteinfegermeister überwacht. Zur Abgrenzung des Geltungsbereiches wurde für das Vorhaben die aus dem Jahr 1996 stammende Fassung der 1. BImSchV (1996) herangezogen.

Unter Haushalte werden alle privaten Haushalte zusammengefasst. Im Bereich der Kleinverbraucher sind die unterschiedlichsten Verbrauchergruppen enthalten. Der Bereich der Kleinverbraucher kann in die Verbrauchergruppen Landwirtschaft und Gartenbau, Handel (Einzel- und Großhandel), Gastgewerbe, Handwerk (z.B. Metall-, Holz- und Baugewerbe), Wäscher und Reiniger, Banken, Versicherungen, Dienstleistungen von Unternehmen und freien Berufen, Öffentliche Einrichtungen und private Organisationen ohne Erwerbscharakter und industrielle Kleinbetriebe gegliedert werden. In Energiebilanzen wird dieser Bereich in der Regel durch einen negativen Ausschluss abgegrenzt, d.h. derjenige Endenergieverbrauch, der nicht eindeutig den Bereichen Haushalte, Verkehr, Energieumwandlung oder Industrie zugeordnet werden kann, wird den Kleinverbrauchern zugewiesen.

Die Emissionsfaktoren und das Emissionsaufkommen liegen, wie beim Emissionsfaktoren-Vorhaben, mit einem hohen Differenzierungsgrad für die alten und neuen Bundesländer sowie Deutschland vor. Die Strukturierung der Emissionsfaktoren orientiert sich hierbei an den verschiedenen Feuerungsbauarten (Gerätebauarten), dem Alter der Feuerungsanlage (unterschieden werden jeweils zwei Altersstufen), den Leistungsbereichen und den typischen Betriebsweisen der Feuerungsanlagen. Alle Angaben innerhalb dieser Arbeit beziehen sich, soweit nicht anders vermerkt, auf das Bezugsjahr 2000.

Die Struktur und Bearbeitungstiefe des Forschungsvorhaben ist sehr stark durch die zur Verfügung stehende Datenbasis vorgegeben. Wesentliche Teilprojekte sowie Bearbeitungsschritte und deren Verknüpfungen sind in **Bild 3.1** schematisch dargestellt.

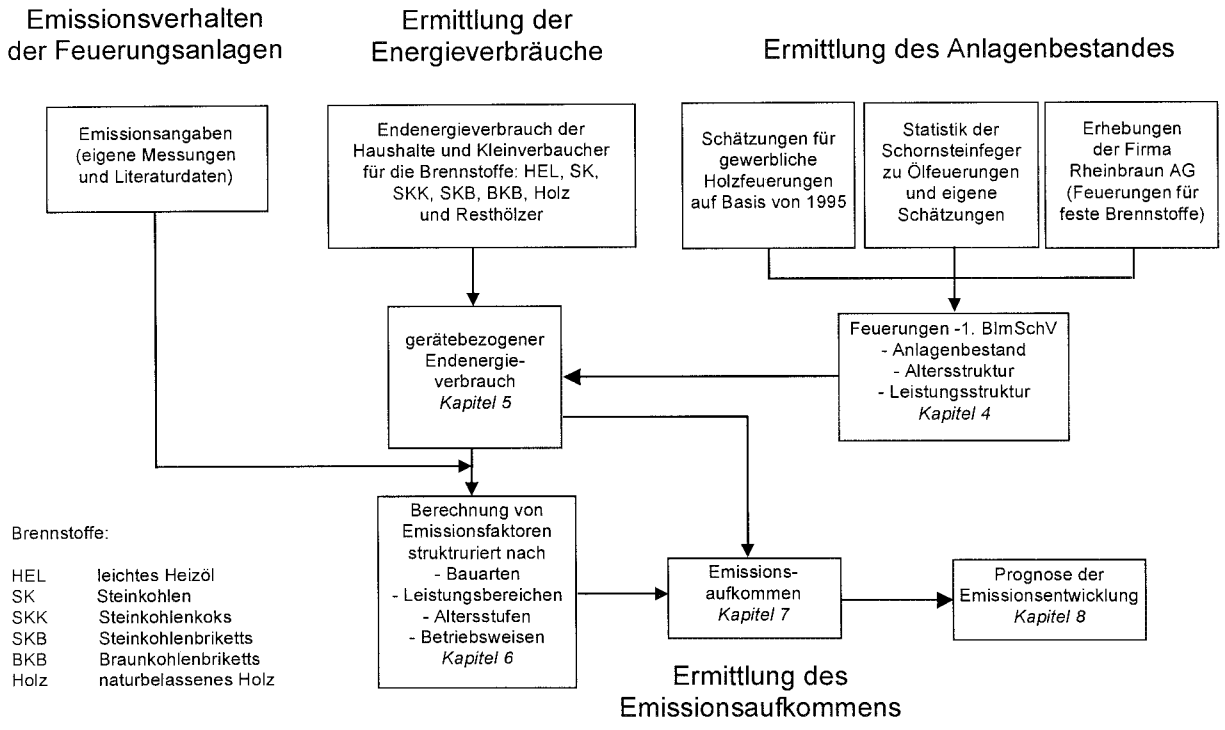


Bild 3.1: Vorgehensweise bei der Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens

Die Ermittlung des Bestandes von Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (in der Fassung aus dem Jahr 1996) erfolgt für Heizkessel mit Ölgebläsebrennern auf Basis der Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks, eigenen Abschätzungen für Ölöfen mit Verdampfungsbrennern, Angaben der Firma Rheinbraun Brennstoff GmbH für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und eigenen Hochrechnungen für gewerbliche Holzfeuerungen.

Die Anzahl der installierten Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher wurde für folgende Brennstoffe ermittelt:

- Heizöl EL, unterschieden nach
  Ölöfen mit Verdampfungsbrennern und Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern
- feste Brennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe) unterschieden nach Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen, Heizkessel (Etagen- und Zentralheizungen sowie gewerbliche Holzfeuerungen), Badeöfen und Herde.

Zur Ermittlung des Emissionsaufkommens sind Angaben zu den gerätespezifischen Endenergieverbräuchen notwendig, die aus dem emissionsrelevanten Endenergieverbrauch berechnet werden. Anhand der Endenergiebilanz des Jahres 2000 für Deutschland erfolgt die Ermittlung des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher strukturiert nach Gerätebauarten und Leistungsbereichen. Bei festen Brennstoffen wird der Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Prozesswärme (Kochen) mit in die Betrachtungen einbezogen, da die Energie teilweise zur Beheizung des Aufstellungsraumes verwendet wird.

Ebenfalls berücksichtigt wird die in der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau eingesetzte Prozesswärme, die vor allem zur Beheizung von Unterglasflächen verwendet wird. In allen anderen Fällen bleibt der geringe Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung in Haushalten und bei Kleinverbrauchern sowie die hierbei entstehenden Emissionen unberücksichtigt.

Eine Aufteilung des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs für die betrachteten Brennstoffe auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgt durch Gegenrechnung aus dem Bestand an Feuerungsanlagen, der Anzahl der Vollbenutzungsstunden und der mittleren Feuerungswärmeleistungen der installierten Feuerungen. Am Ende der Berechnungen steht ein gerätebezogener Endenergieverbrauch mit einem hohen Detaillierungsgrad.

Die Ermittlung der Partikelemissionen der Feuerstätten und der Größenverteilung der Partikel erfolgte durch eine Literaturauswertung und vor allem durch eigene Emissionsmessungen im Rahmen dieses Vorhabens oder anderer bereits abgeschlossener Projekte an installierten Anlagen und auf dem Prüfstand. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind im Berichtsteil Messberichte (Teil I bis IV) beschrieben. Bei der Erhebung der Emissionsdaten wird zwischen den Bauarten der Feuerungen, dem Leistungsbereich, dem Baujahr und der Betriebsweise unterschieden.

Schwerpunktmäßig wurden in diesem Vorhaben Emissionsmessungen durchgeführt, welche die Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für Partikel (Gesamtemission der Partikel und Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}) darstellen. An Einzelfeuerstätten mit einer Nennwärmeleistung von weniger als 15 kW wurden Prüfstandmessungen an einem Dauerbrandofen mit Steinkohlen (Anthrazit und Steinkohlenbriketts), einem Heizeinsatz für Kachelöfen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen, Mitteldeutschen und Böhmischen Revier und Buchenholzscheiten, einem Kamineinsatz mit Buchenholzscheiten und einem Kaminofen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier vorgenommen.

Bei Heizkesseln privater Haushalte wurden Prüfstandsmessungen an zwei Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (ein marktübliches Gerät und eine Altanlage) vorgenommen, die mit Heizöl EL unterschiedlicher Schwefelgehalte ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv betrieben wurden. Außerdem wurden Messungen auf dem Prüfstand an Heizkesseln für Holzbrennstoffe durchgeführt. So wurden Abbrandversuche an einem Stückholzkessel mit Gebläse (Neuanlage, Brennstoff: lufttrockenes Nadel- und Buchenholz), einem Stückholzkessel ohne Gebläse (Altanlage, Brennstoff: lufttrockenes Nadelholz), einer Hackgutfeuerung (Neuanlage, Brennstoff: Hackgut mit zwei unterschiedlichen Feuchtegehalten) und eine Kessel-Pelletfeuerung (Neuanlage, Brennstoff: Holzpellets) vorgenommen.

An Feuerungsanlagen für Holzbrennstoffe der Kleinverbraucher wurden Praxismessungen an einer Vorschubrostfeuerung (Neuanlage) mit Hackschnitzeln und einer Unterschubfeuerung (ältere Anlage) mit Resthölzern durchgeführt. Auf dem Prüfstand wurde das Emissionsverhalten einer Unterschubfeuerung, die mit Resthölzern betrieben wurde, untersucht.

Aus den Ergebnissen der Literaturauswertung und den durchgeführten Prüfstands- und Felduntersuchungen werden unter Berücksichtigung der typischen Betriebsweise und der Bestandsstruktur der Feuerungsanlagen in den alten und neuen Bundesländern Emissionsfaktoren für Partikel (Gesamtmasse und Partikelfraktionen PM_x) berechnet. Die Emissionsfaktoren werden in der Strukturierung Brennstoff, Leistungsbereiche und Alterstufen für jede Gerätebauart ausgewiesen. Aus den gerätespezifischen Emissionsfaktoren werden für die neuen und alten Bundesländer sowie für Deutschland durch anteilige Berücksichtigung des Endenergieverbrauchs einer Gerätebauart für jeden Brennstoff sektorale Emissionsfaktoren berechnet.

Anhand der ermittelten Emissionsfaktoren erfolgt die Berechnung des Emissionsaufkommens für Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV für Haushalte und Kleinverbraucher mit Stand des Jahres 2000 unter den zuvor festgelegten Randbedingungen. Das Emissionsaufkommen wird getrennt für die alten und neuen Bundesländer sowie für Deutschland angegeben. In einer abschließenden Emissionsprognose wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens bis zum Jahr 2020 abgeschätzt.

4 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen

In diesem Kapitel wird für Haushalte und Kleinverbraucher der Anlagenbestand und die Anlagenstruktur in den alten und neuen Bundesländer für das Jahr 2000 beschrieben. Die Tiefe der Klassifizierung und die Ermittlung der Anlagenstruktur der installierten Feuerungsanlagen orientiert sich an der Struktur und den Ergebnissen des Emissionsfaktoren-Vorhabens (Pfeiffer et al., 2000). Aktualisierungen wurden, soweit Daten zugänglich waren, durchgeführt.

Basis für die Ermittlung der Anlagenstruktur von Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern sind die Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks aus dem Jahr 2000 (ZIV, 2002) für die einzelnen Bundesländer, aus denen die Anzahl der installierten Feuerungsanlagen für die verschiedenen Leistungsbereiche und Altersstufen entnommen werden konnten. Hierbei erfolgte die Zuordnung des Bundeslandes Berlin zu den neuen Bundesländern. Eine Differenzierung des Anlagenbestandes in Ost- und Westberlin mit einer entsprechenden Zuordnung zu alten und neuen Bundesländern konnte nicht mehr vorgenommen werden.

Die Anzahl der installierten Ölöfen mit Verdampfungsbrennern, die in den Statistiken des ZIV nur teilweise (Anlagen > 11 kW Nennwärmeleistung) erfasst werden, wurde abgeschätzt. Hierzu wurde angenommen, dass die in Pfeiffer et al. (2000) genannte Anzahl an Ölöfen (dort als Heizgeräte mit Ölbrennern ohne Gebläse bezeichnet) entsprechend der Anzahl von installierten Dauerbrandöfen von 1995 bis zum Jahr 2000 abnimmt.

Die Anzahl der in Deutschland installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe (Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen, Heizkessel, Badeöfen und Herde) wurde anhand von Daten der Firma Rheinbraun Brennstoff GmbH (Rheinbraun, 2002) festgelegt. Für Heizkessel erfolgt in dieser Statistik keine Untergliederung in hand- bzw. mechanisch beschickte Anlagen. Die Aufteilung des Anlagenbestandes auf Haushalte und Kleinverbraucher erfolgte proportional den Angaben von Pfeiffer et al. (2000).

Eigene Abschätzungen wurden für die im gewerblichen Bereich (Holz- und Baugewerbe, sowie Glaser) installierten Holzfeuerungsanlagen durchgeführt, die auf den Berechnungen für das Jahr 1995 (Pfeiffer et. al., 2000) aufbauen. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass aufgrund einer insgesamt zunehmenden thermischen Nutzung von Resthölzern die Anzahl der installierten Anlagen im selben Verhältnis zunimmt.

In **Tabelle 4.1** ist der Bestand an installierten Feuerstätten der Haushalte und Kleinverbrauchern im Geltungsbereich der 1. BImSchV für das Jahr 2000 zusammengefasst dargestellt.

Zur Berechnung der Emissionsfaktoren sind die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern installierten Feuerungsanlagen für die unterschiedlichen Gerätebauarten nach Leistungsbereichen und Altersstufen zu untergliedern. Außerdem werden die mittleren installierten Nennwärmeleistungen der Bauarten benötigt, die in die Berechnung des Endenergieverbrauchs und der gerätespezifischen Verbräuche eingehen (siehe auch Kapitel 5).

Tabelle 4.1: Bestand an installierten Feuerstätten im Geltungsbereich der 1. BImSchV in Haushalten und bei Kleinverbrauchern in Deutschland im Jahr 2000

Energie-träger	Bezeichnung der Feuerstätte	alte Bundesländer [1.000 Stück]	neue Bundesländer [1.000 Stück]	Deutschland * [1.000 Stück]
Heizöl EL	Ölofen mit Verdampfungsbrennern [1]	1.534,9	71,3	1.606,2
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern [2]	5.568,0	754,9	6.322,9
	***Summe** **	***7.102,9***	***826,2***	***7.929,1***
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe)	Heizkessel [3] (Zentral- und Etagenheizungen)	422,4	256,4	678,9
	Dauerbrandöfen [4]	2.060,0	290,0	2.350,0
	Kachelöfen [4] (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)	2.350,0	1.950,0	4.300,0
	Kaminöfen [4]	2.080,0	400,0	2.480,0
	Kamine [4] (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)	2.570,0	300,0	2.870,0
	Badeöfen [4]	110,0	100,0	210,0
	Herde (und Heizungsherde) [4]	1.410,0	340,0	1.750,0
	***Summe** **	***11.002,4***	***3.636,4***	***14.638,9***
Gesamtbestand der Feuerstätten		**18.105,4**	**4.462,6**	**22.568,0**

* geringe Abweichungen durch Verwendung gerundeter Zahlen
[1] eigene Schätzungen
[2] ZIV, 2002
[3] Rheinbraun (2002) und eigene Schätzungen für Heizkessel im Bereich der Kleinverbraucher, Heizkessel (hand- und mechanisch beschickt) einschließlich gewerbliche Holzfeuerungen
[4] Rheinbraun (2002)

Im abgeschlossenen Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) wurde zusätzlich der Bestand an Gasfeuerungen ermittelt. Dieser Betrug für das Bezugsjahr 1995 in den alten Bundesländern insgesamt 11,2 Millionen und in den neuen Bundesländern 2,5 Millionen Stück. Ebenfalls in diesem Vorhaben wurden zur Beschreibung der Anlagenstruktur in Zusammenarbeit mit dem Schornsteinfegerhandwerk eigene Erhebung in ausgewählten Kehrbezirken in den alten und neuen Bundesländern durchgeführt. Wenn keine zusätzlichen Daten vorliegen, werden die Ergebnisse dieser Erhebungen auf den aktuellen Anlagenbestand in Tabelle 4.1 übertragen.

Im folgenden wird die Struktur der in Haushalten und bei Kleinverbrauchern installierten Feuerungsanlagen aufgeführt. Die Alters- und Leistungsstruktur wurde von Pfeiffer et al. (2000) übernommen und orientiert sich am Klassifizierungsraster der Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks. Die Errichtungszeiträume der Feuerungsanlagen wurden in zwei Altersstufen (für die alten Bundesländer: "bis 1988" und "ab 1989" und für die neuen Bundesländer: "bis 1990" und "ab 1991") zusammengefasst. Die ermittelten Anteile der installierten Anlagen in den jeweiligen Alterstufen wurden für die Berechnung der Emissionsfaktoren übernommen.

4.1 Struktur der in Haushalten installierten Feuerungen

Für die alten und neuen Bundesländer geben die **Tabellen 4.2 und 4.3** für die in Haushalten installierten Feuerungen die Aufteilung des Anlagenbestandes in Leistungsbereiche und Altersstufen sowie die mittleren installierten Leistungen wieder.

Tabelle 4.2: Bestand an installierten Feuerstätten und mittlere Leistungen in Haushalten in den **alten** Bundesländern im Jahr 2000 unterteilt in Leistungsbereiche und Alterstufen

Energieträger	Bezeichnung der Feuerung (Gesamtbestand in [1.000 Stück])	Leistungsbereich in kW (mittlere Leistung [1])	Alterstufe	Anzahl insgesamt [1.000 Stück]	davon in Alterstufe Anteil [%]	davon in Alterstufe Anzahl [1.000 Stück]
Heizöl EL	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4 (8 kW)	bis 1988	1.498,6	82	1.228,9
			ab 1989		18	269,7
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (gesamt: 4.886,0)	4 - 25 (20 kW)	bis 1988	1.770,3	30	531,1
			ab 1989		70	1.239,2
		> 25 - 50 (28 kW)	bis 1988	2.760,2	64	1.766,5
			ab 1989		36	993,7
		> 50 (120 kW)	bis 1988	355,5	71	252,4
			ab 1989		29	103,1
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe)	Heizkessel [2] (Zentral- und Etagenheizungen) (gesamt: 383,2)	4 - 25 (20 kW)	bis 1988	187,0	81	151,5
			ab 1989		19	35,5
		> 25 - 50 (35 kW)	bis 1988	161,6	82	132,5
			ab 1989		18	29,1
		> 50 (55 kW)	bis 1988	34,6	82	28,4
			ab 1989		18	6,2
		> 25 [3] (38 kW)	bis 1988	196,2	82	160,1
			ab 1989		18	36,1
	Dauerbrandöfen	< 15 (5,8 kW)	bis 1988	2.039,4	96	1.957,8
			ab 1989		4	81,6
	Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)	< 15 (8,5 kW)	bis 1988	2.221,2	85	1.888,0
			ab 1989		15	333,2
	Kaminöfen	< 15 (7,5 kW)	bis 1988	2.036,5	30	611,0
			ab 1989		70	1.425,5
	Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)	< 15 (7,5 kW)	bis 1988	2.541,0	45	1.143,5
			ab 1989		55	1.397,5
	Badeöfen	< 15 (5 kW)	bis 1988	99,4	91	90,5
			ab 1989		9	8,9
	Herde (und Heizungsherde)	< 15 (5 kW)	bis 1988	1.226,2	98	1.201,7
			ab 1989		2	24,5

[1] die mittlere Leistung wurde aus den Nennwärmeleistungen der installierten Anlagen berechnet und wird deshalb auch als mittlere Nennwärmeleistung bezeichnet

[2] hand- und mechanisch beschickte Heizkessel

[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst

Tabelle 4.3: Bestand an installierten Feuerstätten und mittlere Leistungen in Haushalten in den **neuen** Bundesländern im Jahr 2000 unterteilt in Leistungsbereiche und Alterstufen

Energie-träger	Bezeichnung der Feuerung (Gesamtbestand in [1.000 Stück])	Leistungs-bereich in kW (mittlere Leis-tung [1])	Alters-stufe	Anzahl insgesamt [1.000 Stück]	davon in Alterstufe Anteil [%]	Anzahl [1.000 Stück]
Heizöl EL	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4 (8 kW)	bis 1990	71,3	0	0,0
			ab 1991		100	71,3
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (gesamt: 682,4)	4 - 25 (20 kW)	bis 1990	476,8	1	4,8
			ab 1991		99	472,0
		> 25 - 50 (29 kW)	bis 1990	178,3	10	17,8
			ab 1991		90	160,5
		> 50 (140 kW)	bis 1990	27,3	21	5,7
			ab 1991		79	21,6
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe)	Heizkessel [2] (Zentral- und Etagenheizungen) (gesamt: 248,1)	4 - 25 (17 kW)	bis 1990	160,6	94	151,0
			ab 1991		6	9,6
		> 25 - 50 (28 kW)	bis 1990	69,8	86	60,0
			ab 1991		14	9,8
		> 50 (55 kW)	bis 1990	17,8	89	15,8
			ab 1991		11	2,0
		> 25 [3] (32 kW)	bis 1990	87,5	86	75,3
			ab 1991		14	12,2
	Dauerbrandöfen	< 15 (4,6 kW)	bis 1990	287,1	95	272,7
			ab 1991		5	14,4
	Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)	< 15 (7,2 kW)	bis 1990	1.943,9	98	1.905,0
			ab 1991		2	38,9
	Kaminöfen	< 15 (7,5 kW)	bis 1990	400,0	0	0,0
			ab 1991		100	400,0
	Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)	< 15 (7,5 kW)	bis 1990	300,0	9	27,0
			ab 1991		91	273,0
	Badeöfen	< 15 (5 kW)	bis 1990	99,8	97	96,8
			ab 1991		3	3,0
	Herde (und Heizungsherde)	< 15 (5 kW)	bis 1990	336,8	93	313,2
			ab 1991		7	23,6

[1] die mittlere Leistung wurde aus den Nennwärmeleistungen der installierten Anlagen berechnet und wird deshalb auch als mittlere Nennwärmeleistung bezeichnet

[2] hand- und mechanisch beschickte Heizkessel

[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst

Die Aufteilung der installierten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern aus Tabelle 4.1 auf die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher erfolgte auf Basis der Zahlen von Pfeiffer et al. (2000) unter der Annahme, dass bei Haushalten in den alten Bundesländern die Anzahl der Ölfeuerungen seit 1995 etwas abgenommen und in den neuen Bundesländern zugenommen hat. Die Alterstufen für Heizkessel mit Ölgebläsebrennern wurden mit den Erhebungsdaten des ZIV (2002) aktualisiert, bei Ölöfen mit Verdampfungsbrennern wurde die Alterststruktur von 1995 übernommen.

Bei den Anlagen für feste Brennstoffe erfolgte die Zuordnung zu den Haushalten entsprechend den prozentualen Aufteilungen aus dem Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000), auch die Altersstruktur musste, da keine aktuellen Daten vorhanden sind, hieraus unverändert übernommen werden.

Die Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks weisen für das Jahr 2000 insgesamt 12.284 mechanisch beschickte Feuerstätten auf, die der wiederkehrenden Überwachungspflicht unterliegen, wovon 11.730 Anlagen mit Holzbrennstoffen betrieben wurden (ZIV, 2002). Anhand des eingesetzten Brennstoffs kann nur für einen geringen Teil dieser Anlagen eine Zuordnung zu den Kleinverbrauchern (gewerbliche Holzfeuerungen) vorgenommen werden, wodurch letztlich aber keine Aussage über die Anzahl der in Haushalten oder im Bereich der Landwirtschaft und des Gartenbaus installierten Anlagen möglich wird. Wird die Anzahl der geschätzten gewerblichen Holzfeuerungen mit mechanischer Beschickung (insgesamt ca. 9.800 Stück - siehe Kapitel 4.2) von dieser letztgenannten Zahl des ZIV subtrahiert, so verbleiben lediglich 1.912 Anlage, die diesem Einsatzbereich zugeordnet werden könnten. Würden alle diese Anlagen den Haushalten zugerechnet, so würden mechanisch beschickte Holzfeuerungen einen Anteil von lediglich 0,3 % an den insgesamt über 630.000 installierten Heizkesseln ausmachen. Deshalb wird eine separate Ausweisung von mechanisch beschickten Feuerungen für Holz nur im Bereich der gewerblichen Holzfeuerungen durchgeführt.

4.2 Struktur der bei Kleinverbrauchern installierten Feuerungen

In den **Tabelle 4.4 und 4.5** sind die Bestände an installierten Feuerstätten bei Kleinverbrauchern in den alten und neuen Bundesländern im Jahr 2000 unterteilt in Leistungsbereiche und Alterstufen sowie die mittleren installierten Leistungen aufgeführt.

Die Aufteilung der installierten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern aus Tabelle 4.1 auf die Kleinverbraucher erfolgte auf Basis der Zahlen von Pfeiffer et al. (2000) unter der Annahme, dass sowohl in den alten als auch den neuen Bundesländern die Anzahl der Ölfeuerungen bei Kleinverbrauchern seit 1995 etwas abgenommen hat. Die Alterstufen für Heizkessel mit Ölgebläsebrennern wurden anhand der Erhebungsdaten des ZIV (2002) aktualisiert, bei Ölöfen mit Verdampfungsbrennern wurde die Alterststruktur von 1995 übernommen.

Bei den Anlagen für feste Brennstoffe erfolgte die Zuordnung zu den Kleinverbrauchern entsprechend den prozentualen Aufteilungen aus dem Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) bzw. als absolute Angaben (Anzahl der Kachelöfen, Kaminöfen und Kamine). Die Altersstruktur wurde, da keine aktuellen Daten vorhanden sind, unverändert übernommen. Bei den gewerblichen Holzfeuerungen in den neuen Bundesländern erfolgte eine auf Schätzungen basierende Anpassung der mittleren installierten Leistungen.

Tabelle 4.4: Bestand an installierten Feuerstätten und mittlere Leistungen bei Kleinverbrauchern in den **alten** Bundesländern im Jahr 2000 nach Leistungsbereichen und Alterstufen

Energieträger	Bezeichnung der Feuerung (Gesamtbestand in [1.000 Stück])			Leistungsbereich in kW (mittlere Leistung [1])	Alterstufe	Anzahl insgesamt [1.000 Stück]	davon in Alterstufe Anteil [%]	davon in Alterstufe Anzahl [1.000 Stück]
Heizöl EL	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern			> 4 (9 kW)	bis 1988	36,3	82	29,8
					ab 1989		18	6,5
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (gesamt: 682,0)			4 - 25 (20 kW)	bis 1988	126,3	30	37,9
					ab 1989		70	88,4
				> 25 - 50 (31 kW)	bis 1988	202,1	64	129,3
					ab 1989		36	72,8
				> 50 (130 kW)	bis 1988	353,6	71	251,1
					ab 1989		29	102,5
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe)	Heizkessel (Zentral- u. Etagenheizungen) (gesamt: 39,2)	Heizkessel [2] (gesamt: 16,8)		4 - 25 (24 kW)	bis 1988	3,0	81	2,4
					ab 1989		19	0,6
				> 25 - 50 (44 kW)	bis 1988	11,1	82	9,1
					ab 1989		18	2,0
				> 50 (128 kW)	bis 1988	2,7	82	2,2
					ab 1989		18	0,5
				> 25 [3] (60 kW)	bis 1988	13,3	82	10,9
					ab 1989		18	2,4
		gew. Holzfeuerungen (gesamt: 22,4)	Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50 (76 kW)	bis 1988	14,8	87	12,9
					ab 1989		13	1,9
			Unterschubfeuerungen	> 50 (145 kW)	bis 1988	2,2	69	1,5
					ab 1989		31	0,7
			Vorofenfeuerungen	> 50 (105 kW)	bis 1988	3,1	73	2,3
					ab 1989		27	0,8
			Einblasfeuerungen	> 50 (200 kW)	bis 1988	2,2	79	1,7
					ab 1989		21	0,5
	Dauerbrandöfen			< 15 (5,8 kW)	bis 1988	20,6	96	19,8
					ab 1989		4	0,8
	Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)			< 15 (8,5 kW)	bis 1988	128,8	85	109,5
					ab 1989		15	19,3
	Kaminöfen			< 15 (7,5 kW)	bis 1988	43,5	30	13,1
					ab 1989		70	30,5
	Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)			< 15 (7,5 kW)	bis 1988	29,0	45	13,1
					ab 1989		55	16,0
	Badeöfen			< 15 (5 kW)	bis 1988	10,6	91	9,6
					ab 1989		9	1,0
	Herde (und Heizungsherde)			< 15 (5 kW)	bis 1988	183,8	98	180,1
					ab 1989		2	3,7

[1] die mittlere Leistung wurde aus den Nennwärmeleistungen der installierten Anlagen berechnet und wird deshalb auch als mittlere Nennwärmeleistung bezeichnet

[2] hand- und mechanisch beschickte Heizkessel

[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Heizkessel der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau in den Leistungsbereichen > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst

Tabelle 4.5: Bestand an installierten Feuerstätten und mittlere Leistungen bei Kleinverbrauchern in den **neuen** Bundesländern im Jahr 2000 nach Leistungsbereichen und Alterstufen

Energieträger	Bezeichnung der Feuerung (Gesamtbestand in [1.000 Stück])			Leistungsbereich in kW (mittlere Leistung [1])	Alterstufe	Anzahl insgesamt [1.000 Stück]	davon in Alterstufe Anteil [%]	davon in Alterstufe Anzahl [1.000 Stück]
Heizöl EL	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern			> 4 (9 kW)	bis 1990	0,0	0	0,0
					ab 1991		100	0,0
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (gesamt: 72,5)			4 - 25 (24 kW)	bis 1990	14,3	1	0,1
					ab 1991		99	14,2
				> 25 - 50 (45 kW)	bis 1990	19,0	10	1,9
					ab 1991		90	17,1
				> 50 (200 kW)	bis 1990	39,2	21	8,2
					ab 1991		79	31,0
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe)	Heizkessel (Zentral- u. Etagenheizungen) (gesamt: 8,3)	Heizkessel [2] (gesamt: 1,9)		4 - 25 (24 kW)	bis 1990	0,3	94	0,3
					ab 1991		6	0,0
				> 25 - 50 (40 kW)	bis 1990	0,4	86	0,3
					ab 1991		14	0,1
				> 50 (155 kW)	bis 1990	1,2	89	1,1
					ab 1991		11	0,1
				> 25 [3] (147 kW)	bis 1990	1,3	86	1,1
					ab 1991		14	0,2
		gew. Holzfeuerungen (gesamt: 6,4)	Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50 (85 kW)	bis 1990	4,3	61	2,6
					ab 1991		39	1,7
			Unterschubfeuerungen	> 50 (163 kW)	bis 1990	0,6	0	0,0
					ab 1991		100	0,6
			Vorofenfeuerungen	> 50 (118 kW)	bis 1990	0,9	5	0,0
					ab 1991		95	0,9
			Einblasfeuerungen	> 50 (225 kW)	bis 1990	0,6	0	0,0
					ab 1991		100	0,6
	Dauerbrandöfen			< 15 (5,8 kW)	bis 1990	2,9	95	2,8
					ab 1991		5	0,1
	Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)			< 15 (8,5 kW)	bis 1990	6,2	98	6,1
					ab 1991		2	0,1
	Kaminöfen			< 15 (7,5 kW)	bis 1990	0,0	0	0,0
					ab 1991		100	0,0
	Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)			< 15 (7,5 kW)	bis 1990	0,0	9	0,0
					ab 1991		91	0,0
	Badeöfen			< 15 (5 kW)	bis 1990	0,3	97	0,3
					ab 1991		3	0,0
	Herde (und Heizungsherde)			< 15 (5 kW)	bis 1990	3,2	93	3,0
					ab 1991		7	0,2

[1] die mittlere Leistung wurde aus den Nennwärmeleistungen der installierten Anlagen berechnet und wird deshalb auch als mittlere Nennwärmeleistung bezeichnet

[2] hand- und mechanisch beschickte Heizkessel

[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Heizkessel der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau in den Leistungsbereichen > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst

Bei Kleinverbrauchern werden unter dem Begriff Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen) alle gewerblichen Holzfeuerungen und alle anderen Heizkessel der verschiedenen Verbrauchergruppen zusammengefasst. Für gewerbliche Holzfeuerungen der Verbrauchergruppe Handwerk (Holz- und Baugewerbe sowie Glaser) kann eine Untergliederung in vier unterschiedliche Anlagenarten durchgeführt werden. Bei Heizkesseln, die den Verbrauchergruppen Landwirtschaft und Gartenbau und übrige Kleinverbraucher zugeordnet werden, kann aufgrund der Datenlage keine über den Leistungsbereich und die Alterstufe hinausgehende Differenzierung (z.B. hand- oder mechanisch beschickte Kessel) vorgenommen werden.

Zur Berechnung der Emissionsfaktoren werden die unter Heizkessel aufgeführten Anlagen der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau in den Leistungsbereichen > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengelegt.

In den alten Bundesländern wird die Anzahl der installierten Heizkessel in den Verbrauchergruppen Landwirtschaft und Gartenbau und übrige Kleinverbraucher mit insgesamt 16,8*1.000 Stück angesetzt. Bei einem Gesamtbestand der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau (Leistungsbereiche 4 - 25 kW und > 25 kW) in Höhe von 16,3*1.000 Stück entfallen auf den Leistungsbereich > 25 kW 13,3*1.000 Anlagen. Die verbleibenden 0,5*1.000 Anlagen werden den übrigen Kleinverbrauchern zugerechnet.

Für die neuen Bundesländer wird die Anzahl der installierten Heizkessel in den Verbrauchergruppen Landwirtschaft und Gartenbau und übrige Kleinverbraucher mit insgesamt 1,9*1.000 Stück festgelegt. Bei einem Gesamtbestand der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau (Leistungsbereiche 4 - 25 kW und > 25 kW) in Höhe von 1,6*1.000 Stück entfallen auf den Leistungsbereich > 25 kW 1,3*1.000 Anlagen. Die verbleibenden 0,3*1.000 Anlagen werden den übrigen Kleinverbrauchern zugeordnet.

5 Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher

In diesem Kapitel wird der emissionsrelevante Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher strukturiert nach Gerätebauarten und Leistungsbereichen beschrieben. Als emissionsrelevanter Endenergieverbrauch wird bei Heizöl EL der Brennstoffverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser angesehen. Die Erzeugung von Prozesswärme in Haushalten mit festen Brennstoffen (Kochen) und bei Kleinverbrauchern in der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau (alle Brennstoffe) wird ebenfalls als emissionsrelevant betrachtet. In allen anderen Fällen bleibt der Energieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung in Haushalten und bei Kleinverbrauchern sowie die hierbei entstehenden Emissionen unberücksichtigt.

Den Rahmen für die Aufteilung des Endenergieverbrauchs stellt die von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen mit Stand zum 20. Juli 2001 (AGEB, 2002) erstellte Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2000 dar, die nur beim Verbrauch von Holzbrennstoffen bei Kleinverbrauchern im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau für naturbelassenes Holz sowie im Bereich der gewerblichen Holzfeuerungen für Resthölzer durch eine eigene Abschätzungen, basierend auf den Angaben in Pfeiffer et al. (2000), ergänzt wurde. Bei Kleinverbrauchern wird in der Energiebilanz bisher überhaupt kein Verbrauch von Holzbrennstoffen ausgewiesen.

Für die betrachteten Brennstoffe wird der Endenergieverbrauch für die alten und neuen Bundesländer sowie für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher angegeben. Die Aufteilung des von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen nur für Deutschland angegebenen Endenergieverbrauchs auf die alten und neuen Bundesländer erfolgte für Heizöl EL und Steinkohlenbrennstoffen im wesentlichen auf Grundlage der prozentualen Verteilungen im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000). Beim Heizöl EL wurde allerdings davon ausgegangen, dass der Anteil am Endenergieverbrauch der neuen Bundesländer, entsprechend der angestiegenen Bestandzahlen von Ölfeuerungen, zugenommen hat. Bei Braunkohlenbriketts wurde - wie im Emissionsfaktoren-Vorhaben - angenommen, dass Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier nahezu vollständig in den alten Bundesländern und Braunkohlenbriketts aus den Revieren Mitteldeutschland und Lausitz in den neuen Bundesländern verfeuert werden. Die Höhe der Importe an Braunkohlenbriketts im Jahr 2000 wurden anhand von Angaben der Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. ermittelt (Kohlenwirtschaft, 2001).

In **Tabelle 5.1** ist der berechnete Endenergieverbrauch an Heizöl EL sowie Stein-, Braun- und Holzbrennstoffen für Deutschland im Jahr 2000 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland im Jahr 2000

Endenergieverbrauch im Jahr 2000 in TJ	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Heizöl EL	670.283	76.717	747.000	257.268	47.733	305.000	927.551	124.449	1.052.000
Steinkohlen	3.000	0	3.000	3.192	2.808	6.000	6.657	2.343	9.000
Steinkohlenkoks	7.760	1.240	9.000	2.313	687	3.000	9.936	2.064	12.000
Steinkohlenbriketts	2.788	212	3.000	0	0	0	2.788	212	3.000
Braunkohlenbriketts	9.711	11.289	21.000	0	0	0	9.711	11.289	21.000
davon Rheinisches Revier	*9.122*	*0*	*9.122*	*0*	*0*	*0*	*9.122*	*0*	*9.122*
davon Lausitzer Revier	*0*	*9.451*	*9.451*	*0*	*0*	*0*	*0*	*9.451*	*9.451*
davon Mitteldeutsches Revier	*0*	*1.278*	*1.278*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1.278*	*1.278*
davon Importe	*589*	*560*	*1.149*	*0*	*0*	*0*	*589*	*560*	*1.149*
Holzbrennstoffe	118.800	46.200	165.000	31.061	9.464	40.525	149.861	55.664	205.525
davon naturbelassenes Holz	*118.800*	*46.200*	*165.000*	*7.819*	*1.716*	*9.535*	*126.619*	*47.916*	*174.535*
davon Resthölzer	*0*	*0*	*0*	*23.243*	*7.748*	*30.990*	*23.243*	*7.748*	*30.990*
Summe	**812.342**	**135.658**	**948.000**	**293.834**	**60.691**	**354.525**	**1.106.503**	**196.022**	**1.302.525**

'0' kein Energieeinsatz
aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Holzbrennstoffe: in Form von naturbelassenem Holz (eingesetzt in Haushalten und im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau) und Resthölzern, die sich aus Resten von Holzwerkstoffen und naturbelassenem Holz zusammensetzen

Datenquelle: Angaben für Deutschland aus AGEB (2002), zu Importen an Braunkohlenbriketts aus Kohlenwirtschaft (2001), ergänzt um eigene Schätzungen zum Endenergieverbrauch von Holzbrennstoffen bei Kleinverbrauchern
Angaben für alte und neue Bundesländer entsprechend den Anteilen im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000), ergänzt um eine aktualisierte Aufteilung bei Heizöl EL proportional dem derzeitigen Bestand an Ölfeuerungen

5.1 Emissionsrelevanter Endenergieverbrauch

Die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern eingesetzten Brennstoffe werden im wesentlichen zur Erzeugung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme eingesetzt. In Haushalten werden Brennstoffe zur Prozesswärmeerzeugung (z.B. zum Kochen) nur in einem geringen Umfang verwendet. Im Bereich der Kleinverbraucher ist der Energieeinsatz sehr heterogen. Öffentliche und private Dienstleistungen, Krankenhäuser, Schulen und Badeanlagen können zu den raumwärme- und warmwasserintensiven Verbrauchern gezählt werden. Andere Verbrauchergruppen wie z.B. Landwirtschaft und Gartenbau, Kleinindustrie, Reinigungen und Wäschereien sowie Bäckereien weisen einen vergleichsweise hohen Anteil an Prozesswärme sowie Energieverbrauch an Kraft, Strom und Licht auf.

Im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher wird der Energieverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung durch die Verbrennung von flüssigen Brennstoffen (Heizöl EL) als emissionsrelevant angesehen. In Haushalten wird auch der Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung (nur zum Kochen) mit festen Brennstoffen als emissionsrelevant betrachtet, da Herde für feste Brennstoffe neben dem Kochen auch zur Raumheizung (der Küche oder bei Zentralheizungsherden auch von weiteren Räumen) verwendet werden.

Bei Kleinverbrauchern wird für die Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau die Prozesswärmeerzeugung (vor allem zur Beheizung von Unterglasflächen im Gartenbau) als emissionsrelevant betrachtet. In allen anderen Fällen bleibt der Energieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung in Haushalten und bei Kleinverbrauchern sowie die hierbei entstehenden Emissionen unberücksichtigt.

Der emissionsrelevante Endenergieverbrauch für das Jahr 2000 wird aus den Energieverbräuchen aus Tabelle 5.1 mit den im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) ermittelten prozentualen Anteilen der Verwendungsgebiete Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Kraft, Strom, Licht am Endenergieverbrauch für Haushalte und Kleinverbraucher berechnet. Die verwendeten prozentualen Anteile des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs am gesamten Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher sind für die neuen und alten Bundesländer in **Tabelle 5.2** aufgeführt.

Tabelle 5.2: Prozentuale Anteile des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs am gesamten Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher für die neuen und alten Bundesländer (nach Pfeiffer et al., 2000)

emissionsrelevanter Energieanteil in %	Haushalte	Kleinverbraucher	
	aBL / nBL	aBL	nBL
Heizöl EL	100	84,7	
Stein- und Braunkohlenbrennstoffe	100	93,3	92,4
Holzbrennstoffe		99,7	

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer

Im Bereich der Haushalte wird bei allen Brennstoffen der Endenergieverbrauch vollständig zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser verwendet. Bei Kleinverbrauchern wird bei allen Brennstoffen ein geringer Anteil des Endenergieverbrauchs zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt, die im Rahmen des Vorhabens als nicht emissionsrelevant angesehen wird.

In **Tabelle 5.3** ist der ermittelte emissionsrelevante Endenergieverbrauch an Heizöl EL sowie Stein-, Braun- und Holzbrennstoffen für Deutschland im Jahr 2000 zusammengestellt.

Tabelle 5.3: Emissionsrelevanter Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland im Jahr 2000

emissionsrelevanter Endenergieverbrauch im Jahr 2000 in TJ	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Heizöl EL	670.283	76.717	747.000	217.983	40.444	258.427	888.266	117.161	1.005.427
Steinkohlen	3.000	0	3.000	2.979	2.595	5.574	5.979	2.595	8.574
Steinkohlenkoks	7.760	1.240	9.000	2.159	634	2.794	9.919	1.874	11.794
Steinkohlenbriketts	2.788	212	3.000	0	0	0	2.788	212	3.000
Braunkohlenbriketts	9.711	11.289	21.000	0	0	0	9.711	11.289	21.000
davon Rheinisches Revier	*9.122*	*0*	*9.122*	*0*	*0*	*0*	*9.122*	*0*	*9.122*
davon Lausitzer Revier	*0*	*9.451*	*9.451*	*0*	*0*	*0*	*0*	*9.451*	*9.451*
davon Mitteldeutsches Revier	*0*	*1.278*	*1.278*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1.278*	*1.278*
davon Importe	*589*	*560*	*1.149*	*0*	*0*	*0*	*589*	*560*	*1.149*
Holzbrennstoffe	118.800	46.200	165.000	30.952	9.432	40.384	149.752	55.632	205.384
davon naturbelassenes Holz	*118.800*	*46.200*	*165.000*	*7.791*	*1.710*	*9.502*	*126.591*	*47.910*	*174.502*
davon Resthölzer	*0*	*0*	*0*	*23.161*	*7.721*	*30.882*	*23.161*	*7.721*	*30.882*
Summe	**812.342**	**135.658**	**948.000**	**254.074**	**53.105**	**307.179**	**1.066.415**	**188.763**	**1.255.179**

'0' kein Energieeinsatz
aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Holzbrennstoffe: in Form von naturbelassenem Holz (eingesetzt in Haushalten und im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau) und Resthölzern, die sich aus Resten von Holzwerkstoffen und naturbelassenem Holz zusammensetzen

Datenquelle: Angaben aus Tabelle 5.1 verrechnet mit emissionsrelevanten Energieanteilen (nach Pfeiffer et al., 2000) aus Tabelle 5.2

Die Aufteilung des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgt, getrennt für die betrachteten Brennstoffe, durch Gegenrechnung aus dem Bestand an Feuerstätten einer Bauart, der Anzahl an Vollbenutzungsstunden und der mittleren Nennwärmeleistung der installierten Feuerungen (die mittleren Nennwärmeleistungen der installierten Anlagen wurden aus Kapitel 4 entnommen). Am Ende der durchgeführten Berechnungen steht ein gerätebezogener Endenergieverbrauch mit hohem Detaillierungsgrad. Der aus dem emissionsrelevanten Endenergieverbrauch ermittelte gerätebezogene Endenergieverbrauch wird zur Berechnung der Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 6) und des Emissionsaufkommens (siehe Kapitel 7) herangezogen.

5.2 Gerätebezogener Energieverbrauch der Feuerungsanlagen

Der emissionsrelevante Endenergieverbrauch im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher wird im folgenden strukturiert nach Gerätegruppen und Leistungsbereiche aufgeschlüsselt. Dieser gerätebezogene Endenergieverbrauch wird zur Berechnung des Emissionsaufkommens einer Gerätebauart, z.B. Dauerbrandöfen, im Jahr 2000 herangezogen. Die Struktur des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs ist auf die Bearbeitungstiefe der Anlagenstruktur und der Emissionsfaktoren abgestimmt. Durch Multiplikation des strukturiert erstellten Energieverbrauchs bzw. der Emissionsfaktoren kann dann das aktuelle Emissionsaufkommen für das Jahr 2000 für Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher berechnet werden.

Die Aufteilung des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgt, getrennt für die betrachteten Brennstoffe, durch Gegenrechnung aus dem Bestand an Feuerstätten einer Bauart, der Anzahl an Vollbenutzungsstunden und der mittleren Leistung der installierten Feuerungen. Die mittleren (Nennwärme-) Leistungen der installierten Anlagen wurden aus den Nennwärmeleistungen der Geräte berechnet und sind in den Tabellen 4.2 bis 4.5 aufgeführt (aus Pfeiffer et al., 2000).

Die Anzahl der installierten Feuerstätten einer Bauart beinhaltet alle Geräte, die betriebsbereit in Haushalten oder bei Kleinverbrauchern eingebaut sind, unabhängig davon, ob diese z.B. regelmäßig oder nie betrieben werden. Vor allem im Bereich der festen Brennstoffe gibt es eine nicht unerhebliche Zahl an Feuerstätten, die nur selten oder gelegentlich genutzt werden, da sie ausschließlich als Zusatz- oder Komfortheizung dienen. Innerhalb einer Bauart wird die über den Anlagenbestand gemittelte Nutzungshäufigkeit der Feuerstätten durch die festgelegte Anzahl der Vollbenutzungsstunden berücksichtigt (siehe Pfeiffer et al., 2000).

Die Anzahl der jährlichen Vollbenutzungsstunden gibt die Betriebsdauer der Feuerstätte pro Jahr bei Nennwärmeleistung an. Unter der jährlichen Betriebsdauer wird die Summe der Zeiträume verstanden, während denen Verbrennungsvorgänge in der Feuerstätte stattfinden. Dies ist z.B. bei Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern die Summe der jährlichen Brennerlaufzeiten (ohne Vorbelüftungsphasen) oder bei chargenweise beschickten Holzfeuerungen die Summe der Zeiträume, in denen ein Chargenabbrand stattfindet. Je nach Bau- und Ausführungsart der Feuerung setzen sich die Vollbenutzungsstunden u.U. aus Zeiträumen unterschiedlicher Wärmeleistungen, z.B. bei handbeschickten Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, zusammen. Um die Berechnung des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs zu vereinfachen, sind alle Zeiträume entsprechend ihren Wärmeleistungen in der Rechengröße "Vollbenutzungsstunden" enthalten. Die Vollbenutzungsstunden entsprechen nur dann der Betriebsdauer der Feuerstätte, wenn diese immer bei Nennwärmeleistung betrieben wird. Wird die Feuerstätte mit Wärmeleistungen kleiner der Nennwärmeleistung betrieben, so ist die effektive jährliche Betriebsdauer entsprechend länger. Da die Rechengröße "Vollbenutzungsstunden" u.U. nicht das tatsächliche Betriebsverhalten der installierten Feuerstätten wiedergibt, erfolgt die Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens ggf. unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeleistungen (Lastfälle). Hierzu wird in einem weiteren Berechnungsschritt für alle betrachteten Bauarten von Feuerungen deren gerätebezogener Endenergieverbrauch auf die spezifischen Lastfälle (siehe Kapitel 6) verteilt.

Haushalte

In **Tabelle 5.4** sind die gerätebezogenen Endenergieverbräuche im Jahr 2000 für die installierten Ölfeuerungen im Bereich der Haushalte in den alten und neuen Bundesländern aufgelistet. Die Anlagenbestände und die mittleren Nennwärmeleistungen der Feuerungen wurden aus den Tabellen 4.2 und 4.3 übernommen.

Tabelle 5.4: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der in Haushalten installierten Ölfeuerungen in den alten und neuen Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Ölfeuerungen in Haushalten	Leistungs-bereich	Anlagen-bestand [1]	jährliche Voll-benutzungs-stunden [2]	mittlere Nennwärme-leistung [1]	gerätebezogener Endenergie-verbrauch	
	[kW]	[1.000 Stück]	[h]	[kW]	[TJ]	[%]
alte Bundesländer						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	1.498,6	450	8	19.422	2,9
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	1.770,3	1.160	20	147.857	22,0
	> 25 - 50	2.760,2	1.260	28	350.562	52,2
	> 50	355,5	1.000	120	153.348	22,8
Summe	> 4	6.384,6			671.189	100,0
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					906	0,1
neue Bundesländer						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	71,3	450	8	924	1,2
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	476,8	1.100	20	37.759	49,1
	> 25 - 50	178,3	1.310	29	24.387	31,7
	> 50	27,3	1.000	140	13.754	17,9
Summe	> 4	753.7			76.824	100,0
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					107	0,1

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.2 und 4.3
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)

Im Jahr 2000 hatten bei den Haushalten in den alten Bundesländern die Heizkessel mit Ölgebläsebrennern im Leistungsbereich > 25 - 50 kW den größten Anteil (52,2 %) am gesamten Endenergieverbrauch der Ölfeuerungen (670.283 TJ nach Tabelle 5.3). Der Anteil am Endenergieverbrauch für Ölöfen mit Verdampfungsbrennern ist mit 2,9 % gering. Für die neuen Bundesländer wurde im Jahr 2000 ein Endenergieverbrauch der Ölfeuerungen im Bereich Hauhalte von 76.717 TJ (siehe Tabelle 5.3) angesetzt, wobei 49,1 % in Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern im Leistungsbereich 4 - 25 kW verfeuert wurde.

In den **Tabellen 5.5 und 5.6** sind die berechneten gerätebezogenen Endenergieverbräuche im Jahr 2000 für die installierten Feuerungen für feste Brennstoffe im Bereich der Haushalte in den alten und neuen Bundesländern aufgelistet. Die Anlagenbestände und die mittleren Nennwärmeleistungen der Feuerungen wurden aus den Tabellen 4.2 sowie 4.3 übernommen. Die Aufteilung der Festbrennstoffe auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgte proportional den Angaben im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000).

Tabelle 5.5: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der in Haushalten installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in den alten Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Feuerstätten für feste Brennstoffe in Haushalten (alte Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1] [1.000 St.]	jährliche Vollbenutzungsstunden [2] [h]	mittlere Nennwärmeleistung [1] [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	187,0	950	20	12.789	9,0
	> 25 - 50	161,6	950	35	19.344	13,6
	> 50	34,6	950	55	6.514	4,6
	> 25 [3]	*196,2*	*950*	*38*	*25.086*	*17,6*
Dauerbrandöfen	< 15	2.039,4	520	5,8	22.143	15,5
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	2.541,0	250	7,5	17.152	12,0
Kaminöfen	< 15	2.036,5	315	7,5	17.320	12,2
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	2.221,2	650	8,5	44.179	31,0
Badeöfen	< 15	99,4	110	5	197	0,1
Herde	< 15	1.226,2	130	5	2.869	2,0
Summe (ohne [3])	> 4	10.546,8			142.506	100
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					448	0,3

Feuerstätten für feste Brennstoffe (alte Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	EEV [TJ]	davon [4] Rheinische BKB [TJ]	[%]	Steinkohlen [TJ]	[%]	SKB [TJ]	[%]	SKK [TJ]	[%]	naturbel. Holz [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	12.789	154	1,6	228	7,6	-	-	0	0,0	12.407	10,4
	> 25 - 50	19.344	233	2,4	345	11,4	-	-	0	0,0	18.767	15,7
	> 50	6.514	78	0,8	116	3,9	-	-	0	0,0	6.319	5,3
	> 25 [3]	*25.086*	-	-	-	-	-	-	-	-	*25.086*	*21,0*
Dauerbrandöfen	< 15	22.143	1.116	11,5	1.883	62,5	1.647	59,2	6.428	82,9	11.069	9,3
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	17.152	1.614	16,6	-	-	192	6,9	-	-	15.346	12,9
Kaminöfen	< 15	17.320	1.630	16,8	-	-	194	7,0	-	-	15.496	13,0
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	44.179	4.236	43,6	441	14,6	702	25,2	1.329	17,1	37.470	31,4
Badeöfen	< 15	197	52	0,5	-	-	-	-	-	-	145	0,1
Herde	< 15	2.869	605	6,2	-	-	49	1,7	-	-	2.215	1,9
Summe (ohne [3])	> 4	142.506	9.718	100	3.013	100	2.783	100	7.757	100	119.235	100
Abweichung zu Tabelle 5.3			8	0,1	13	0,4	5	0,2	3	0,0	435	0,4

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.2 und 4.3
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)
[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst
[4] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen
'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz
'0' Energieeinsatz kann nicht ausgewiesen werden
EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch
BKB Braunkohlenbriketts SKB Steinkohlenbriketts SKK Steinkohlenkoks

Tabelle 5.6: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der in Haushalten installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in den neuen Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Feuerstätten für feste Brennstoffe in Haushalten (neue Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1] [1.000 St.]	jährliche Vollbenutzungsstunden [2] [h]	mittlere Nennwärmeleistung [1] [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	160,6	930	17	9.142	15,5
	> 25 - 50	69,8	940	28	6.610	11,2
	> 50	17,8	940	55	3.306	5,6
	> 25 [3]	*87,5*	*940*	*32*	*7.519*	*12,8*
Dauerbrandöfen	< 15	287,1	520	4,6	2.472	4,2
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	300,0	250	7,5	2.025	3,4
Kaminöfen	< 15	400,0	315	7,5	3.402	5,8
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	1.943,9	615	7,2	30.987	52,6
Badeöfen	< 15	99,8	110	5	198	0,3
Herde	< 15	336,8	130	5	788	1,3
Summe (ohne [3])	> 4	3.615,6			58.929	100
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					13	0,0

Feuerstätten für feste Brennstoffe (neue Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	EEV [TJ]	davon [4] Mitteldeutsche BKB [TJ]	[%]	Lausitzer BKB [TJ]	[%]	SKB [TJ]	[%]	SKK [TJ]	[%]	naturbel. Holz [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 – 25	9.142	236	17,6	1.744	17,6	-	-	231	18,6	6.932	15,0
	> 25 - 50	6.610	170	12,7	1.261	12,7	-	-	167	13,4	5.012	10,8
	> 50	3.306	85	6,3	631	6,3	-	-	83	6,7	2.507	5,4
	> 25 [3]	*7.519*	-	-	-	-	-	-	-	-	*7.519*	*16,3*
Dauerbrandöfen	< 15	2.472	79	5,9	582	5,9	55	25,9	290	23,4	1.467	3,2
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	2.025	24	1,8	181	1,8	0	0,0	-	-	1.820	3,9
Kaminöfen	< 15	3.402	41	3,1	304	3,1	0	0,0	-	-	3.057	6,6
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	30.987	687	51,2	5.085	51,2	157	74,1	469	37,8	24.588	53,2
Badeöfen	< 15	198	4	0,3	32	0,3	-	-	-	-	161	0,3
Herde	< 15	788	15	1,2	114	1,2	0	0,0	-	-	658	1,4
Summe (ohne [3])	> 4	58.929	1.342	100	9.933	100	212	100	1.240	100	46.201	100
Abweichung zu Tabelle 5.3			3	0,2	11	0,1	0	0,0	0	0,0	1	0,0

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.2 und 4.3
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)
[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst
[4] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen
'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz
'0' Energieeinsatz kann nicht ausgewiesen werden
EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch
Anmerkung zu nicht aufgeführten Steinkohlen: kein Energieeinsatz
BKB Braunkohlenbriketts SKB Steinkohlenbriketts SKK Steinkohlenkoks

Kleinverbraucher

In **Tabelle 5.7** sind die gerätebezogenen Endenergieverbräuche im Jahr 2000 für die installierten Ölfeuerungen im Bereich der Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern aufgelistet. Die Anlagenbestände und die mittleren Nennwärmeleistungen der Feuerungen wurden aus Tabelle 4.4 sowie 4.5 übernommen.

Tabelle 5.7: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der bei Kleinverbrauchern installierten Ölfeuerungen in den alten und neuen Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Ölfeuerungen bei Kleinverbrauchern	Leistungs-bereich [kW]	Anlagen-bestand [1] [1.000 Stück]	jährliche Voll-benutzungs-stunden [2] [h]	mittlere Nennwärme-leistung [1] [kW]	gerätebezogener Endenergie-verbrauch [TJ]	[%]
alte Bundesländer						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	36,3	350	9	412	0,2
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	126,3	1.150	20	10.426	4,8
	> 25 - 50	202,1	1.100	31	24.807	11,4
	> 50	353,6	1.100	130	182.048	83,6
Summe	> 4	718,3			217.692	100,0
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					290	0,1
neue Bundesländer						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	0,0	350	9	0	0,0
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	14,3	1.150	24	1.417	3,5
	> 25 - 50	19,0	1.200	45	3.698	9,1
	> 50	39,2	1.250	200	35.308	87,3
Summe	> 4	72,5			40.423	100,0
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					21	0,1

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.4 und 4.5
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)

Im Jahr 2000 hatten bei den Kleinverbrauchern in den alten und neuen Bundesländern die Heizkessel mit Ölgebläsebrennern im Leistungsbereich > 50 kW den größten Anteil (83,6 bzw. 87,3 %) am gesamten Endenergieverbrauch der Ölfeuerungen (217.983 bzw. 40.444 TJ nach Tabelle 5.3). Der Endenergieverbrauch der Ölöfen mit Verdampfungsbrennern ist vernachlässigbar gering.

In den **Tabellen 5.8 und 5.9** sind die berechneten gerätebezogenen Endenergieverbräuche im Jahr 2000 für die installierten Feuerungen für feste Brennstoffe im Bereich der Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern aufgelistet. Die Anlagenbestände und die mittleren Nennwärmeleistungen der Feuerungen wurden aus Tabelle 4.4 und 4.5 übernommen. Die Aufteilung der Festbrennstoffe auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgte proportional den Angaben im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000).

Tabelle 5.8: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der bei Kleinverbrauchern installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in den alten Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Feuerstätten für feste Brennstoffe bei Kleinverbrauchern (alte Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1] [1.000 St.]	jährliche Vollbenutzungsstunden [2] [h]	mittlere Nennwärmeleistung [1] [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen, ohne gewerbliche Holzfeuerungen)	4 - 25	3,0	950	24	248	1,9
	> 25 - 50	11,1	1.690	44	2.975	23,1
	> 50	2,7	2.560	128	6.438	50,0
	> 25 [3]	*13,3*	*1.580*	*60*	*4.544*	*35,3*
Dauerbrandöfen	< 15	20,6	500	5,8	215	1,7
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	29,0	160	7,5	125	1,0
Kaminöfen	< 15	43,5	230	7,5	270	2,1
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	128,8	520	8,5	2.050	15,9
Badeöfen	< 15	10,6	110	5	21	0,2
Herde	< 15	183,8	160	5	529	4,1
Summe 1 (ohne [3])	> 4	433,2			12.872	100
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [5])						
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	14,8	2.750	76	11.111	48,6
Unterschubfeuerungen	> 50	2,2	2.950	145	3.466	15,2
Vorofenfeuerungen	> 50	3,1	2.950	105	3.518	15,4
Einblasfeuerungen	> 50	2,2	2.950	200	4.776	20,9
Summe 2	> 50	22,4			22.870	100
Summe 1 und 2		455,7			35.742	
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					349	1,0

Fortsetzung Tabelle 5.8:

Feuerstätten für feste Brennstoffe (alte Bundesländer)	Leistungs-bereich	EEV	davon [4]							
			Steinkohlen		SKK		naturbel. Holz		Holzwerk-stoffe	
	[kW]	[TJ]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	248	0	0,0	0	0,0	248	3,2	-	-
	> 25 - 50	2.975	39	1,3	28	1,3	2.908	37,3	-	-
	> 50	6.438	2.807	94,5	1.998	94,4	1.636	21,0	-	-
	> 25 [3]	*4.544*	-	-	-	-	*4.544*	*58,4*	-	-
Dauerbrandöfen	< 15	215	125	4,2	90	4,3	0	0,0	-	-
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	125	-	-	-	-	125	1,6	-	-
Kaminöfen	< 15	270	-	-	-	-	270	3,5	-	-
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	2.050	0	0	0	0,0	2.050	26,3	-	-
Badeöfen	< 15	21	-	-	-	-	21	0,3	-	-
Herde	< 15	529	-	-	-	-	529	6,8	-	-
Summe (ohne [3])	> 4	12.872	2.971	100	2.117	100	7.788	100	-	-
Abweichung zu Tabelle 5.3			8	0,3	43	2,0	3	0,0	-	-
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [5])										
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	11.111	-	-	-	-	8.659	48,5	2.446	48,7
Unterschubfeuerungen	> 50	3.466	-	-	-	-	2.710	15,2	760	15,1
Vorofenfeuerungen	> 50	3.518	-	-	-	-	2.743	15,4	760	15,1
Einblasfeuerungen	> 50	4.776	-	-	-	-	3.735	20,9	1.058	21,1
Summe	> 50	22.870	-	-	-	-	17.847	100	5.024	100

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.4 und 4.5
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)
[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst
[4] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen
[5] Resthölzer setzen sich aus naturbelassenem Holz und Holzwerkstoffen zusammen
'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz
'0' Energieeinsatz kann nicht ausgewiesen werden
EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch
Anmerkung zu nicht aufgeführten Braunkohlen- und Steinkohlenbriketts: kein Energieeinsatz
SKK Steinkohlenkoks

Tabelle 5.9: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der bei Kleinverbrauchern installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in den neuen Bundesländern im Jahr 2000 (eine Zusammenstellung der Angaben für Deutschland ist in Anhang A enthalten)

Feuerstätten für feste Brennstoffe bei Kleinverbrauchern (neue Bundesländer)	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1] [1.000 St.]	jährliche Vollbenutzungsstunden [2] [h]	mittlere Nennwärmeleistung [1] [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen, ohne gewerbliche Holzfeuerungen)	4 - 25	0,3	1.100	24	27	0,6
	> 25 - 50	0,4	2.200	40	114	2,3
	> 50	1,2	2.875	155	4.556	92,4
	> 25 [3]	*1,3*	*2.060*	*147*	*1.526*	*30,9*
Dauerbrandöfen	< 15	2,9	800	5,8	48	1,0
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	0,0	160	7,5	0	0,0
Kaminöfen	< 15	0,0	230	7,5	0	0,0
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	6,2	900	8,5	169	3,4
Badeöfen	< 15	0,3	130	5	1	0,0
Herde	< 15	3,2	250	5	14	0,3
Summe 1 (ohne [3])	> 4	14,4			4.931	100
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [5])						
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	4,3	2.750	85	3.565	48,5
Unterschubfeuerungen	> 50	0,6	2.950	163	1.115	15,2
Vorofenfeuerungen	> 50	0,9	2.950	118	1.131	15,4
Einblasfeuerungen	> 50	0,6	2.950	225	1.539	20,9
Summe 2	> 50	6,4			7.348	100
Summe 1 und 2		20,8			12.279	
Abweichung zum emissionsrelevanten Endenergieverbrauch in Tabelle 5.3					382	3,0

Fortsetzung Tabelle 5.9:

Feuerstätten für feste Brennstoffe (neue Bundesländer)	Leistungs-bereich	EEV	davon [4]							
			Steinkohlen		SKK		naturbel. Holz		Holzwerk-stoffe	
	[kW]	[TJ]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	27	0	0,0	0	0,0	27	1,6	-	-
	> 25 - 50	114	7	0,3	2	0,3	105	6,0	-	-
	> 50	4.556	2.551	99,7	583	92,1	1.421	81,8	-	-
	> 25 [3]	*1.526*	-	-	-	-	*1.526*	*87,9*	-	-
Dauerbrandöfen	< 15	48	0	0,0	48	7,7	0	0,0	-	-
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	0	-	-	-	-	0	0,0	-	-
Kaminöfen	< 15	0	-	-	-	-	0	0,0	-	-
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	169	0	0,0	0	0,0	169	9,7	-	-
Badeöfen	< 15	1	-	-	-	-	1	0,0	-	-
Herde	< 15	14	-	-	-	-	14	0,8	-	-
Summe (ohne [3])	> 4	4.931	2.559	100	633	100	1.737	100	-	-
Abweichung zu Tabelle 5.3			36	1,4	1	0,2	27	1,6	-	-
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [5])										
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	3.565	-	-	-	-	2.785	48,5	783	48,7
Unterschubfeuerungen	> 50	1.115	-	-	-	-	874	15,2	244	15,2
Vorofenfeuerungen	> 50	1.131	-	-	-	-	884	15,4	244	15,2
Einblasfeuerungen	> 50	1.539	-	-	-	-	1.199	20,9	335	20,9
Summe	> 50	7.348	-	-	-	-	5.743	100	1.606	100

[1] Angaben zum Anlagenbestand und zur mittleren Nennwärmeleistung aus Tabellen 4.4 und 4.5
[2] aktualisierte Angaben in Anlehnung an Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000)
[3] für naturbelassenes Holz wurden zur Berechnung der Emissionsfaktoren die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst
[4] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen
[5] Resthölzer setzen sich aus naturbelassenem Holz und Holzwerkstoffen zusammen
'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz
'0' Energieeinsatz kann nicht ausgewiesen werden
EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch
Anmerkung zu nicht aufgeführten Braunkohlen- und Steinkohlenbriketts: kein Energieeinsatz
SKK Steinkohlenkoks

6 Ermittlung der Emissionsfaktoren

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Emissionsfaktoren beschrieben. Ausgangspunkt für die Berechnung der Emissionsfaktoren bilden Emissionsangaben, die sowohl aus der Literatur entnommen als auch durch eigene Messungen ermittelt wurden. Aus den Emissionsangaben zu den Partikelemissionen werden, unter Berücksichtigung der Betriebsweise der Feuerung und der Altersstufe, die gerätespezifischen Emissionsfaktoren für die unterschiedlichen Feuerungsbauarten und Leistungsbereiche ermittelt. Die Emissionsfaktoren werden sowohl für die alten und neuen Bundesländer als auch für Deutschland für die verschiedenen Brennstoffen angegeben.

Aus den gerätebezogenen Emissionsfaktoren werden für die betrachteten Brennstoffe in Verbindung mit dem anteiligen Endenergieverbrauch, sektorale Emissionsfaktoren für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher (jeweils nur nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, 1996) berechnet.

Bild 6.1 zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung der gerätespezifischen und sektoralen Emissionsfaktoren.

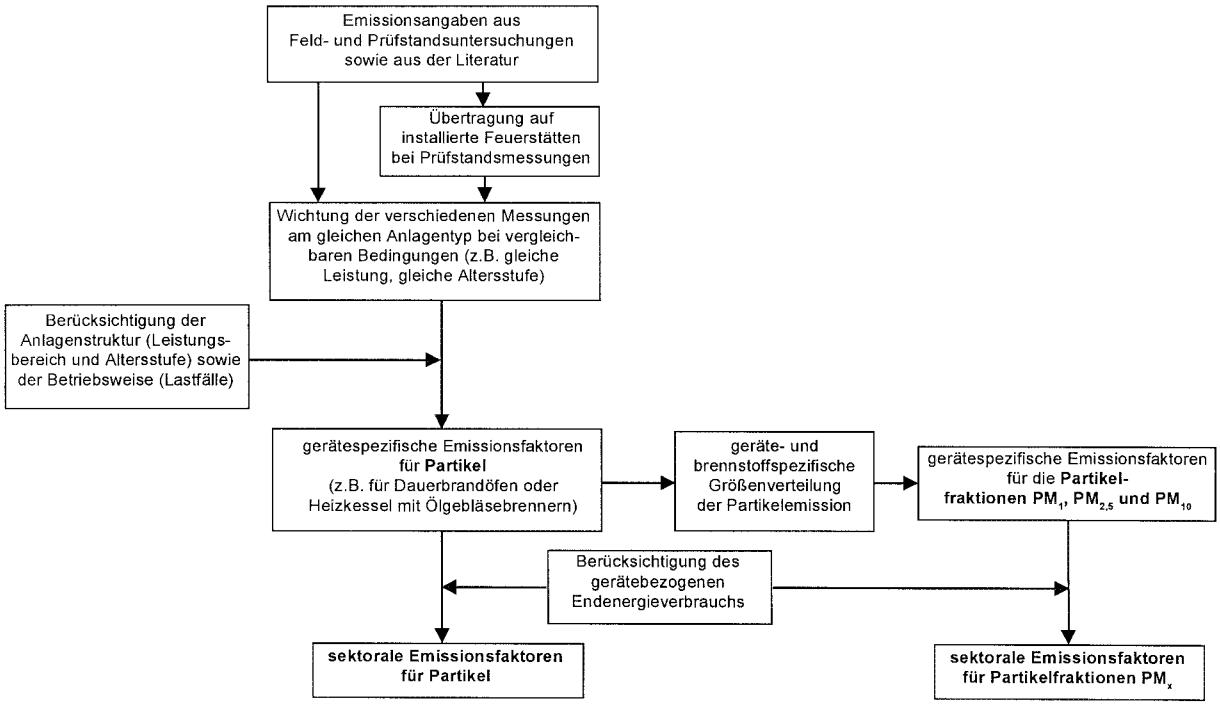


Bild 6.1: Vorgehensweise zur Ermittlung der Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} werden aus den Emissionsfaktoren für Partikel anhand der gemessenen bzw. aus der Literatur entnommenen geräte- und brennstoffspezifischen Größenverteilungen der Partikel berechnet.

6.1 Differenzierung der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren werden für die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern eingesetzten Brennstoffe Heizöl EL, Braunkohlenbriketts, Steinkohlen (verfügbare Emissionsangaben umfassen meist nur Anthrazit), Steinkohlenkoks, Steinkohlenbriketts, naturbelassenes Holz und Resthölzer (Produktionsreste von naturbelassenem Holz und von Holzwerkstoffen) ermittelt. Bei Braunkohlenbriketts wird unterschieden zwischen Briketts aus dem Rheinischen, Lausitzer und Mitteldeutschen Revier. In den neuen Bundesländern werden Braunkohlenbriketts aus dem Böhmischen Revier stellvertretend für Importe betrachtet.

Bei den für die alten und neuen Bundesländern erstellten Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (Fassung von 1996) wird zwischen Haushalten und Kleinverbrauchern unterschieden. Die Berechnung der Emissionsfaktoren für Deutschland erfolgt auf der Basis der Emissionsfaktoren für die alten und neuen Bundesländer unter Berücksichtigung des anteiligen Endenergieverbrauchs.

Die Strukturierung der Emissionsfaktoren bezüglich der Feuerungsbauarten orientiert sich für jeden Brennstoff an der üblicherweise eingesetzten und in großer Anzahl im Bestand vorhandenen Gerätetechnik. Bei der Abgrenzung der Gerätebauarten gegeneinander wurde für Ölfeuerungen auf die Bezeichnungen des ZIV zurückgegriffen. Bei Feuerstätten für feste Brennstoffe wurden die Bezeichnungen in Anlehnung an die zutreffenden DIN-Normen festgelegt. Die Strukturierung der Emissionsfaktoren entspricht in ihrem Differenzierungsgrad der Bestandsstruktur der installierten Feuerungsanlagen (siehe Kapitel 4) und der Struktur des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs (siehe Kapitel 5).

Die Differenzierung für Ölfeuerungen und Feuerungen für feste Brennstoffe nach Gerätebauarten und den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher ist in **Tabelle 6.1** dargestellt.

Die Berechnung der Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe im Bereich der Haushalte basiert auf Emissionsangaben für handbeschickte Feuerungen, in denen Stein- und Braunkohlenbrennstoffe und naturbelassenes Holz verbrannt wurde. Der Einsatz von Holzbriketts in den hierfür geeigneten Feuerungsanlagen kann aufgrund der Datenlage nicht separat betrachtet werden, da weder ausreichende Angaben zum Brennstoffverbrauch (insgesamt und gerätespezifisch) noch zum Emissionsverhalten der Feuerungen vorliegen. Auch für den Einsatz von Holzpellets in hierfür vorgesehenen Feuerungsanlagen können keine Emissionsfaktoren in der beschriebenen Tiefe und Struktur genannt werden, da auch für diesen Bereich keine detaillierten Daten zum (gerätespezifischen) Endenergieverbrauch und zum Gerätebestand vorliegen. Aufgrund des derzeit noch geringen Anlagenbestandes und damit geringen Endenergieverbrauchs kann allerdings davon ausgegangen werden, dass der Einfluss dieser Bauarten (z.B. Pelletkessel oder Kaminöfen) auf die mittleren oder sektoralen Emissionsfaktoren und auf das Emissionsaufkommen gering bzw. nicht darstellbar ist.

Tabelle 6.1: Differenzierung der Emissionsfaktoren

Brennstoff	Bezeichnung der Feuerstätte	Leistungs-bereiche in kW
Haushalte und Kleinverbraucher		
Heizöl EL	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern (Raumheizer und Heizeinsätze für Kachelöfen)	> 4
	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25 > 25 - 50 > 50
Kohlenbrennstoffe und naturbelassenes Holz	Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25 > 25 - 50 > 50 (> 25 [1])
	Dauerbrandöfen	< 15
	Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)	< 15
	Kaminöfen	< 15
	Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)	< 15
	Badeöfen	< 15
	Herde (und Heizungsherde)	< 15
Kleinverbraucher		
Resthölzer (Produktionsreste von naturbelassenem Holz und Holzwerkstoffen)	Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50
	Unterschubfeuerungen	> 50
	Vorofenfeuerungen	> 50
	Einblasfeuerungen	> 50

[1] für naturbelassenes Holz wurden die Leistungsbereiche > 25 - 50 kW und > 50 kW zum Leistungsbereich > 25 kW zusammengefasst

In Haushalten waren im Jahr 2000 mechanisch beschickte Heizkessel für die Verfeuerung von naturbelassenen Hackschnitzel nur in einer vergleichsweise geringen Zahl in Gebrauch (siehe auch Kapitel 4.1). Der anteilige Endenergieverbrauch dieser kontinuierlich beschickten Holzfeuerungen in Haushalten ist somit im Vergleich zu Scheitholz, welches in handbeschickten Heizkesseln verbrannt wird, nahezu unbedeutend. Für in Haushalten installierte und mit naturbelassenem Holz betriebene Heizkessel wird der Emissionsfaktor somit fast ausschließlich durch die gerätebezogenen Emissionsfaktoren der handbeschickten Heizkessel bestimmt.

Im Bereich der Kleinverbraucher wird bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe zwischen dem Einsatz an naturbelassenem Holz in der Verbrauchergruppe Landwirtschaft und Gartenbau und dem Einsatz von Resthölzern in gewerblichen Holzfeuerungen unterschieden. Resthölzer in Form von Holzwerkstoffen dürfen nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von mindestens 50 kW und nur in Betrieben der Holzbe- oder -verarbeitung eingesetzt werden (1. BImSchV, 1996 und 2001), was bei der Differenzierung der Emissionsfaktoren für den Bereich der Kleinverbraucher vorausgesetzt wurde. Es wurde weiterhin unterstellt, dass die verfeuerten Brennstoffe bestimmungsgemäß und nur in den nach Herstellerangaben geeigneten Feuerungen eingesetzt werden.

6.2 Berechnung der Emissionsfaktoren für Partikel

Bei den aus der Literatur und aus eigenen Untersuchungen übernommenen Angaben der Partikelemissionen wurde zwischen Messungen am Prüfstand und an installierten Feuerungen unterschieden. Da Prüfstandsuntersuchungen unter definierten Randbedingungen durchgeführt werden, sind die hierbei erhaltenen Emissionswerte nicht ohne weiteres mit Emissionswerten aus Untersuchungen an installierten Feuerungsanlagen vergleichbar. Um für die Berechnung der Emissionsfaktoren eine gemeinsame Basis zu schaffen, wurden die Emissionsangaben aus Prüfstandsmessungen mit Hilfe eines Übertragungsfaktors auf die Verhältnisse von installierten Feuerungen transformiert. Die Höhe des Übertragungsfaktors wurde individuell für die jeweilige Abgaskomponente in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Feuerung festgelegt (siehe auch Pfeiffer et al., 2000).

Das Emissionsverhalten der Feuerungen (im realen Betrieb) wird außer vom eingesetzten Brennstoff und der Bauart der Feuerungsanlage auch von deren Betriebsweise beeinflusst. Die Betriebsweise der Feuerung wird in dieser Arbeit durch die Wärmeleistung charakterisiert. Unterschieden werden, je nach Feuerung, maximal die drei Wärmeleistungsbereiche (bezeichnet als Lastfälle oder Laststufen) Schwachlast, Teillast und Nennlast.

Da von vielen Feuerungsanlagen auch Emissionswerte für die unterschiedlichen Lastfälle vorliegen, müssen diese auf eine geeignete Art und Weise zu einem Emissionsfaktor zusammengefasst werden. Dies geschieht über eine Wichtung der Emissionswerte mit Hilfe der jährlich eingesetzten Brennstoffmenge in einem Lastfall. Dieser anteilige prozentuale Brennstoffeinsatz errechnet sich aus der verfeuerten Brennstoffmenge in einem Lastfall im Verhältnis zur gesamten verfeuerten Brennstoffmenge des Heizgerätes (zur Berechnung der gerätespezifischen Endenergieverbräuche siehe Kapitel 5.2).

Der berechnete Emissionsfaktor unter Berücksichtigung der Betriebsweise ergibt sich unter Verwendung des anteiligen lastabhängigen Brennstoffeinsatzes aus der Summe der gewichteten Emissionsfaktoren für jeden Lastfall. Dieser Berechnungsgang ist ausführlich im Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) beschrieben.

In der folgenden **Tabelle 6.2** sind die in Pfeiffer et al. (2000) berechneten lastabhängigen Brennstoffeinsätze zusammengefasst aufgeführt. Diese wurde für die Berechnung der Emissionsfaktoren ohne Änderung übernommen. Dies gilt auch für die Altersstruktur der installierten Feuerungsanlagen (siehe Kapitel 4), die zur Berechnung der Emissionsfaktoren ebenfalls herangezogen wurde.

Tabelle 6.2: Anteiliger lastabhängiger Brennstoffeinsatz zur Berücksichtigung der Betriebsweise bei der Berechnung der Emissionsfaktoren für Haushalte und Kleinverbraucher

Bereich	Feuerung		Lastfall	Altersstufen	anteiliger lastabhängiger Brennstoffeinsatz in %	
Haushalte und Kleinverbraucher	Dauerbrandöfen		Nennlast	aBL: bis 1988 nBL: bis 1990	Kohlenbrennstoffe: 40	naturbelassenes Holz: 40
			Teillast		27	60
			Schwachlast		33 [1]	-
			Nennlast	aBL: ab 1989 nBL: ab 1991	60	40
			Teillast		40	60
	Kachelöfen		Nennlast	alle	40	40
			Teillast		60	60
	Kamine		Nennlast	alle	58	58
			Teillast		42	42
	Kaminöfen		Nennlast	alle	58	58
			Teillast		42	42
	Heizkessel		Nennlast	aBL: bis 1988 nBL: bis 1990	36	36
			Teillast		25	64
			Schwachlast		39 [2]	-
			Nennlast	aBL: ab 1989 nBL: ab 1981	36	36
			Teillast		64	64
	Badeöfen		Nennlast	alle	100	100
			Teillast		-	-
	Herde		Nennlast	alle	70	70
			Teillast		30	30
	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern		Teillast	aBL: bis 1988 nBL: bis 1990	Heizöl EL: 70	
			Nennlast		30	
			Teillast	aBL: ab 1989 nBL: ab 1991	60	
			Nennlast		40	
Haushalte	Heizkessel mit Ölgebläsebrennern im Leistungsbereich	4 - 25 kW	Teillast	aBL: bis 1988 nBL: bis 1990	Heizöl EL: 0	
		> 25 - 50 kW	Nennlast		100	
		> 50 kW	Teillast		10	
			Nennlast		90	
		4 - 25 kW	Teillast	aBL: ab 1989 nBL: ab 1991	0	
			Nennlast		100	
		> 25 - 50 kW	Teillast		2	
			Nennlast		98	
		> 50 kW	Teillast		51	
			Nennlast		49	
Kleinverbraucher		4 - 25 kW > 25 - 50 kW > 50 kW	Teillast	alle	2	
			Nennlast		98	
	Heizkessel-Schachtfeuerungen		Nennlast	alle	Resthölzer: 28	
			Teillast		72	
	Einblasfeuerungen		Nennlast	alle	27	
			Teillast		69	
			Gluthaltebetrieb		4	
	Unterschubfeuerungen		Nennlast	alle	27	
			Teillast		69	
			Gluthaltebetrieb		4	
	Vorofenfeuerungen		Nennlast	alle	27	
			Teillast		69	
			Gluthaltebetrieb		4	

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer

\- bauart-, brennstoff- oder nutzungsbedingt wurde kein anteiliger Brennstoffeinsatz angesetzt

[1] für Braunkohlenbriketts in nBL keine Schwachlastanteile angesetzt (Teillastanteil: 60 %)

[2] für Braunkohlenbriketts in nBL keine Schwachlastanteile angesetzt (Teillastanteil: 64 %)

6.3 Emissionsfaktoren für Partikel

In **Tabelle 6.3** sind die ermittelten sektoralen Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher strukturiert nach Brennstoffen und alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland aufgelistet.

Tabelle 6.3: Sektorale Emissionsfaktoren für Partikel von Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Jahr 2000

Partikel	Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	86	92	86	18	18	18	63	24	54
Steinkohlen	*18*	-	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*
Steinkohlenbriketts	*159*	*92*	*154*	-	-	-	*159*	*92*	*154*
Steinkohlenkoks	16	16	16	17	17	17	16	16	16
Braunkohlenbriketts	89	88	89	-	-	-	89	88	89
Rheinisch	*89*			-	-				
Lausitzer		*72*			-				
Mitteldeutsche		*120*			-				
Importe (Böhmische)		*289*			-				
Holzbrennstoffe	118	111	116	73	76	73	108	105	107
naturbelassenes Holz	*118*	*111*	*116*						
*naturbelassenes Holz **				*71*	*71*	*71*			
Holzwerkstoffe				*80*	*96*	*84*			
Heizöl EL	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern
leeres Feld kein anteiliger Endenergieverbrauch angesetzt, deshalb wurden keine Emissionsfaktoren ermittelt
\- Brennstoff wird derzeit in diesen Bereichen nicht eingesetzt
aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Die Emissionsfaktoren für Partikel bei Feuerungsanlagen für leichtes Heizöl im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sind vergleichsweise niedrig und unterscheiden sich für die Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer kaum. Aufgrund des neueren Anlagenbestandes in den neuen Bundesländern sind die Werte dort noch etwas geringer als im ehemaligen Bundesgebiet.

Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe weisen deutlich höhere Emissionsfaktoren für Partikel auf. Bei der Verbrennung von Steinkohlenkoks und Steinkohlen werden für diese Brennstoffe noch die niedrigsten Faktoren ermittelt, die sich auch für die beiden Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer nur wenig unterscheiden.

Bei Steinkohlen wird der Emissionsfaktor nahezu ausschließlich durch die Emissionsangaben bei der Verbrennung von Anthrazitkohlen bestimmt, die ca. 98 % der im Jahr 2000 in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher genutzten Steinkohlen ausmachen. Die restlichen 2 % entfallen auf Fettkohlen. Hierbei wurde für Anthrazitkohlen ein Emissionsfaktor von 6 kg/TJ und für Fettkohlen von 630 kg/TJ angesetzt. Der Emissionsfaktor für Steinkohlen ergibt sich durch die anteilige Berücksichtigung dieser beiden Kohlenarten.

Der hohe Emissionsfaktor für Steinkohlenbriketts bei Haushalten wird wesentlich durch Messergebnisse an Dauerbrandöfen, vor allem im Teil- und Schwachlastbetrieb, verursacht. In Dauerbrandöfen werden rund 60 % der Steinkohlenbriketts verfeuert, wobei der Anteil des Teil- und Schwachlastbetriebs ebenfalls 60 % beträgt.

Die Emissionsfaktoren bei Braunkohlenbriketts sind abhängig von der Herkunft der Briketts. Bei Briketts aus dem Lausitzer Revier basiert der Emissionsfaktor auf Messergebnissen an unterschiedlichen Heizgeräten, die auf dem Prüfstand und als installierte Anlagen im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben wurden. Untersuchungen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier wurden auch bei anderen Wärmeleistungen (Teil- und Schwachlast) durchgeführt. Da im Teil- und Schwachlastbetrieb die Partikelemissionen der untersuchten Feuerstätten gegenüber dem Nennlastbetrieb zunahmen, ergibt sich für Briketts aus dem Rheinischen Revier insgesamt ein höherer Emissionsfaktor.

Bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Böhmischen Revier, die stellvertretend für importierte Briketts in den neuen Bundesländern stehen, ergaben sowohl im Teillast- als auch beim Nennlastbetrieb der Feuerstätten hohe bis sehr hohe Partikelkonzentrationen.

Die Emissionsfaktoren für Partikel der mit Holzbrennstoffen betrieben Feuerungsanlagen liegen für beide Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer in einer relativ engen Bandbreite und unterscheiden sich nicht grundsätzlich. Diese Faktoren wurden anhand der Ergebnisse von Prüfstands- und Feldmessungen an den unterschiedlichsten Feuerstätten beim Betrieb mit Nennlast und auch bei Teillast ermittelt.

Zum Vergleich mit den aktuellen Emissionsfaktoren für Partikel sind in **Tabelle 6.4** die Werte aus dem Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) für das Jahr 1995 aufgeführt.

Durch die Berücksichtigung neuer Messergebnisse und durch die Aktualisierung des Energieeinsatzes ändern sich die Emissionsfaktoren für Partikel aus dem Jahr 1995 gegenüber den aktuellen Werten für Heizöl EL geringfügig und bei festen Brennstoffen deutlicher, vor allem bei Steinkohlen und Steinkohlenbriketts sowie bei Holzbrennstoffen.

Im Jahr 1995 wurden an Steinkohlen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher neben Anthrazit- und Fettkohlen auch Gasflammkohlen eingesetzt. Der Anteil von Anthrazit betrug hierbei 72 %, von Fettkohle 18 % und von Gasflammkohle 10 %. Als Emissionsfaktoren für Anthrazit- und Fettkohlen wurden in den Jahren 1995 und 2000 identische Werte (Anthrazit: 6 kg/TJ, Fettkohle: 630 kg/TJ) angesetzt. Bei Gasflammkohle wurde mit einem Emissionsfaktor für Partikel von 1.600 kg/TJ gerechnet. Durch den starken Rückgang beim Einsatz von Fettkohlen (Anteil im Jahr 2000: 2 %) und den Wegfall von Gasflammkohlen im Haushalts- und Kleinverbraucherbereich ergibt sich aktuell der wesentlich geringere Emissionsfaktor für Steinkohlen.

Tabelle 6.4: Sektorale Emissionsfaktoren für Partikel von Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Jahr 1995 (nach Pfeiffer et al., 2000)

Partikel	Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 1995					
	Haushalte			Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	257	167	254	278	278	278
Steinkohlen	*278*	-	*278*	*278*	*278*	*278*
Steinkohlenbriketts	*225*	*167*	*221*	-	-	-
Steinkohlenkoks	14	15	15	12	11	12
Braunkohlenbriketts	115	76	86	-	59	59
Rheinisch	*115*			-	-	
Lausitzer		*29*			*38*	
Mitteldeutsche		*110*			*79*	
Importe (Böhmische)		*290*			*144*	
Holzbrennstoffe	41	43	42	44	51	45
naturbelassenes Holz	*41*	*43*	*42*			
*naturbelassenes Holz **				*39*	*43*	*39*
Holzwerkstoffe				*77*	*97*	*80*
Heizöl EL	1,6	1,4	1,6	1,7	1,7	1,7

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern

leeres Feld kein anteiliger Endenergieverbrauch angesetzt, deshalb wurden keine Emissionsfaktoren ermittelt

\- Brennstoff wird derzeit in diesen Bereichen nicht eingesetzt

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Für den Einsatz von naturbelassenem Holz in Feuerungsanlagen der Haushalten und bei Kleinverbrauchern konnten neue Messwerte für Einzelfeuerstätten und Heizkessel berücksichtigt werden. Vor allem durch Ergebnisse beim Teillastbetrieb der Feuerungen, wo meist auch höhere Partikelkonzentrationen als beim Betrieb mit Nennwärmeleistung gemessen wurden, erhöhen sich die neuberechneten sektoralen Emissionsfaktoren.

Bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen können die Konzentrationen von organischen Verbindungen im Abgas von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe stark zunehmen. Diese Verbindungen kondensieren zum Teil bei Umgebungstemperatur und liegen dann in flüssiger oder fester Form vor. In diesem Fall setzen sich die Partikelemissionen aus einem filterbaren und einem kondensierbaren Anteil zusammen. Damit auch der kondensierbare Partikelanteil erfasst wird, erfolgte bei den eigenen Messungen für Feuerungsanlagen mit erhöhten VOC-Konzentrationen die Partikelprobenahme im verdünnten Abgas (Verdünnungstunnel) im Temperaturbereich von 30 bis 50 °C. In den ausgewerteten Literaturstellen erfolgte die Partikelprobenahme dagegen meist bei höheren Abgastemperaturen, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt wird.

Der Zusammenhang zwischen Partikelkonzentration und Abgaszustand wurde in einem anderen Vorhaben an zwei Einzelfeuerstätten untersucht, die mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier bei unterschiedlichen Wärmeleistungen betrieben wurden. Bei der Probenahme im verdünnten Abgas ergab sich hierbei eine in etwa doppelt so hohe Partikelkonzentrationen wie bei der Probenahme im heißen Abgas (Struschka et al., 2001).

Die berechneten gerätespezifischen Emissionsfaktoren und das gerätespezifische Emissionsaufkommen sind im **Anhang B** "gerätebezogene Emissionsfaktoren und -aufkommen", getrennt nach alten und neuen Bundesländern und Deutschland sowie nach Haushalten und Kleinverbrauchern enthalten. Die Gliederung richtet sich hierbei nach dem Brennstoff.

Die im Anhang B aufgeführten Emissionsfaktoren für Deutschland wurden aus den mit dem entsprechenden Brennstoffeinsatz gewichteten Emissionsfaktoren der alten und neuen Bundesländer berechnet. Zur Ableitung eines Emissionsfaktors für den Einsatz an Braunkohlebriketts in Deutschland wurde die Wichtung anteilig den Einsatzmengen für Rheinische, Lausitzer, Mitteldeutsche und importierte (hier stellvertretend betrachtet: Briketts aus dem Böhmischen Revier) Braunkohlenbriketts durchgeführt. Bei Kleinverbrauchern werden keine Braun- und Steinkohlenbriketts mehr eingesetzt. Somit wurden hier auch keine Emissionsfaktoren berechnet.

Die Emissionsfaktoren wurden auf die Anzahl der angegebenen signifikanten Dezimalstellen gerundet. Für einige Brennstoffe besteht brennstoffbedingt keine Eignung zur Verfeuerung in bestimmten Feuerstätten. So ist z.B. Steinkohlenkoks nicht zur Verfeuerung in Kaminöfen geeignet. In diesen Fällen wurde statt eines Emissionsfaktors ein "-" in die Tabellen eingetragen. Mit angegeben sind jeweils die aus den gerätebezogenen Emissionsfaktoren berechneten sektoralen Emissionsfaktoren für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher. Bei der Berechnung der sektoralen Emissionsfaktoren aus den gerätebezogenen Faktoren wurde der anteilige Endenergieverbrauch berücksichtigt. Für Steinkohlen und Steinkohlenbriketts wurde auch ein gemeinsamer Emissionsfaktor berechnet.

6.4 Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x

Die Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} werden aus den Emissionsfaktoren für Partikel anhand der gemessenen bzw. aus der Literatur entnommenen und in den Messberichten Teil I bis IV dargestellten geräte- und brennstoffspezifischen Größenverteilungen der Partikel berechnet.

Die Untersuchungsergebnisse an Einzelfeuerstätten zeigen, dass die Größenverteilungen der Partikel im verdünnten Abgas nur unwesentlich von der Bauart der Feuerstätte, der Wärmeleistung und den Verbrennungsbedingungen, und damit der Partikelkonzentration, abhängen. Einen erkennbaren Einfluss auf die Größenverteilung der Partikel hat allerdings der verwendete Brennstoff. Deshalb werden für die Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} jeweils die Mittelwerte für die verschiedenen Brennstoffe aus den Angaben der Tabelle 6.2 (siehe Teil I der Messberichte) direkt übernommen.

Bei den Messungen an Heizkesseln für Holzbrennstoffe zeigten sich teilweise etwas größere Unterschiede in den Anteilen der Partikelfraktionen für die untersuchten Heizkessel. So waren vor allem beim modernen Stückholzkessel und Betrieb bei Nennwärmeleistung mit Fich-

tenholz die Anteile der Partikelfraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ vergleichsweise gering (siehe auch Tabelle 12 im Teil III der Messberichte). Der Anteil der Nennwärmeleistung am Endenergieverbrauch beträgt für mit Scheitholz betriebene Heizkessel allerdings nur 36 %.

Für Stückholzkessel werden mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} aus den Messergebnissen beim Kessel mit moderner und alter Technik und den eingesetzten Scheithölzern sowie bei den gemessenen Wärmeleistungen berechnet. In einem weiteren Schritt werden diese Mittelwerte mit dem Endenergieeinsatz gewichtet. Diese Werte werden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x für Stückholzkessel herangezogen. Die Berechnung ist in **Tabelle 6.5** aufgeführt.

Tabelle 6.5: Berechnung mittlerer Partikelfraktionen PM_x bei Heizkesseln für Holzbrennstoffe und Angaben für den Pelletofen

Angaben aus Tabelle 12 - Teil III der Messberichte:										
Feuerungstyp	Brennstoff	Anteile der Partikelfraktionen in %								
		NWL			MWL			KWL		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Stückholzkessel (modern)	Scheite, (Fichte)	34,5	46,2	78,7				69,0	76,7	93,5
	Scheite, (Buche)							76,9	81,9	91,4
Stückholzkessel (alte Technik)	Scheite	78,9	88,9	96,7				82,4	89,7	96,8
Hackgutfeuerung (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	89,2	91,5	95,8	92,9	95,5	99,4	84,4	88,7	96,0
	Hackgut, w = 35 %	64,5	66,5	78,5	89,8	92,6	97,5	84,6	88,8	96,5
Pelletkessel (Neuanlage)	Holzpellets	62,4	68,4	94,6	89,0	91,6	98,7	91,1	93,9	99,1

Berechnung von Mittelwerten (Brennstoffe und Leistungsbereiche werden zusammengefasst - Angaben gerundet):									
Feuerungstyp	Brennstoff	Anteile der Partikelfraktionen in %							
		alle Leistungsbereiche			Lastanteile (in %)		alle Leistungsbereiche		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	Teillast	Nennlast	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Stückholzkessel (Heizkessel)	naturbelassenes Holz	68	77	91	64	36	71	79	92
Hackgutfeuerungen	Hackgut	84	87	94	für diese Feuerungen werden keine Emissionsfaktoren berechnet				
Pelletkessel	Holzpellets	78	83	94					

Angaben für Pelletofen aus Tabelle 6.2 - Teil I der Messberichte zum Vergleich:					
Feuerungstyp	Brennstoff	Anteile der Partikelfraktionen in %			für Pelletöfen werden keine Emissionsfaktoren berechnet
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
Pelletofen (Kaminofen)	Holzpellets	93	95	99	

Für die in Tabelle 6.5 ebenfalls aufgeführten Hackgut- und Pelletkessel sowie für den Pelletofen werden, aufgrund der geringen Anzahl an installierten Anlagen in Haushalten (siehe auch Hinweis in Kapitel 4:1) im Jahr 2000 keine Emissionsfaktoren ermittelt. Bei Holzkesseln und Kaminöfen werden sowohl die Emissionsfaktoren für als auch das Emissionsaufkommen durch handbeschickte Anlagen bestimmt.

Bei den Anlagen der Kleinverbraucher lassen sich aus den Messergebnissen keine grundsätzliche Tendenzen (Einflüsse von Brennstoff, Betriebsweise oder Abgasreinigung) ableiten, die zur Berechnung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen herangezogen werden könnten. Deshalb werden die Anteile der Partikelfraktionen PM_x für naturbelassenes Holz (als Restholz) und Holzwerkstoffe als Mittelwerte aus den vorliegenden Messergebnis-

sen zur Ermittlung der Emissionsfaktoren herangezogen. Diese Angaben werden aus Tabelle 6.2 im Teil IV der Messberichte übernommen.

Die im Teil II der Messberichte aufgeführten Ergebnisse für die beiden untersuchten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (siehe dort Tabelle 6.1) lassen beim verwendeten marktüblichen Heizöl EL kaum Unterschiede in den Partikelanteilen erkennen. Deshalb erfolgt die Festlegung für die Anteile der Partikelfraktionen PM_x bei Ölfeuerungen als Mittelwert aus diesen Messungen.

In **Tabelle 6.6** sind die zur Berechnung der Emissionsfaktoren verwendeten mittleren Anteile der Partikelfraktionen für die verschiedenen Brennstoffe zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 6.6: Zur Berechnung der Emissionsfaktoren herangezogene mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x

Bereich	Feuerung	Brennstoff	Anteil der Fraktion in %		
			PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Haushalte und Kleinverbraucher	Dauerbrandöfen Kachelöfen Kamine Kaminöfen Badeöfen [1] Herde [1]	Steinkohlen	85	90	97
		Steinkohlenbriketts [2]	99	100	100
		Rheinische BKB	78	85	95
		Lausitzer BKB	89	93	98
		Mitteldeutsche BKB	77	85	94
		importierte BKB (nBL)	72	86	95
		naturbelassenes Holz	92	96	99
	Heizkessel (Stückholzkessel)	naturbelassenes Holz	71	79	92
	Ölöfen mit Verdampfungsbrennern [1] Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	Heizöl EL	85	100	100
Kleinverbraucher (gew. Holzfeuerungen)	Heizkessel-Schachtfeuerungen [3]	naturbelassenes Holz	71	79	92
	Einblasfeuerungen [1] Unterschubfeuerungen Vorofenfeuerungen [1]		77	88	97
	Heizkessel-Schachtfeuerungen [3]	Holzwerkstoffe	71	79	92
	Einblasfeuerungen [1] Unterschubfeuerungen Vorofenfeuerungen [1]		64	70	88

[1] für diese Feuerungen liegen keine Partikelverteilungen vor. Die Angaben der im selben Feld aufgeführten Feuerungen werden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren herangezogen

[2] Angaben werden auch für Steinkohlenkoks herangezogen

[3] Angaben von Heizkesseln (Stückholzkessel) übertragen

BKB Braunkohlenbriketts nBL neue Bundesländer

In **Tabelle 6.7** sind die mit diesen prozentualen Anteilen berechneten sektoralen Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_x für Feuerungsanlagen der betrachteten Brennstoffe in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher aufgeführt. Die berechneten gerätespezifischen Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen sind ebenfalls im **Anhang B** enthalten.

Tabelle 6.7: Sektorale Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_x für Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Jahr 2000

Partikelfraktion PM_1	Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	84	91	84	16	16	16	61	22	51
Steinkohlen	*16*	-	*16*	*16*	*16*	*16*	*16*	*16*	*16*
Steinkohlenbriketts	*157*	*91*	*153*	-	-	-	*157*	*91*	*153*
Steinkohlenkoks	16	16	16	17	17	17	16	16	16
Braunkohlenbriketts	70	74	72	-	-	-	70	74	72
Rheinisch	*70*			-	-				
Lausitzer		*64*			-				
Mitteldeutsche		*92*			-				
Importe (Böhmische)		*207*			-				
Holzbrennstoffe	100	94	98	55	55	55	90	88	90
naturbelassenes Holz	*100*	*94*	*98*						
*naturbelassenes Holz **				*55*	*53*	*54*			
Holzwerkstoffe				*53*	*64*	*56*			
Heizöl EL	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

Partikelfraktion $PM_{2,5}$	Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	85	92	85	17	17	17	62	22	52
Steinkohlen	*17*	-	*17*	*17*	*17*	*17*	*17*	*17*	*17*
Steinkohlenbriketts	*159*	*92*	*154*	-	-	-	*159*	*92*	*154*
Steinkohlenkoks	16	16	16	17	17	17	16	16	16
Braunkohlenbriketts	76	80	78	-	-	-	76	80	78
Rheinisch	*76*			-	-				
Lausitzer		*67*			-				
Mitteldeutsche		*102*			-				
Importe (Böhmische)		*247*			-				
Holzbrennstoffe	106	100	104	60	61	60	96	94	96
naturbelassenes Holz	*106*	*100*	*104*						
*naturbelassenes Holz **				*60*	*59*	*60*			
Holzwerkstoffe				*58*	*71*	*61*			
Heizöl EL	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7

Partikelfraktion PM_{10}	Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	86	92	86	18	18	18	63	24	53
Steinkohlen	*18*	-	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*
Steinkohlenbriketts	*159*	*92*	*154*	-	-	-	*159*	*92*	*154*
Steinkohlenkoks	16	16	16	17	17	17	16	16	16
Braunkohlenbriketts	85	85	85	-	-	-	85	85	85
Rheinisch	*85*			-	-				
Lausitzer		*70*			-				
Mitteldeutsche		*113*			-				
Importe (Böhmische)		*275*			-				
Holzbrennstoffe	114	107	112	68	70	69	104	101	103
naturbelassenes Holz	*114*	*107*	*112*						
*naturbelassenes Holz **				*68*	*67*	*68*			
Holzwerkstoffe				*71*	*86*	*75*			
Heizöl EL	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

7 Berechnung des Emissionsaufkommens

Die Berechnungsgrundlage für die Ermittlung des Emissionsaufkommens in den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher für das Jahr 2000 bilden die in Kapitel 5.2 ausgewiesenen gerätebezogenen Endenergieverbräuche sowie die ermittelten gerätebezogenen Emissionsfaktoren aus Anhang B. Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen sind für das gerätebezogene Emissionsaufkommen ebenfalls in **Anhang B** zusammengestellt. Aus dem gerätebezogenen Emissionsaufkommen wird dann durch Addition das sektorale Emissionsaufkommen für einen Brennstoff in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher berechnet, wobei unterschieden wird zwischen alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland.

Das berechnete Emissionsaufkommen der Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher ist für Partikel in **Tabelle 7.1** enthalten. Die Berechnung der dargestellten Emissionsaufkommen erfolgte durch Addition der gerätebezogenen Emissionsaufkommen innerhalb eines Bereiches für jeden zu betrachtenden Energieträger. Eine vollständige Zusammenstellung der berechneten sektoralen Emissionsaufkommen für Partikel auf der Basis der gerätebezogenen Emissionsaufkommen ist im **Anhang C** gegeben.

Tabelle 7.1: Emissionsaufkommen für Partikel in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland im Bezugsjahr 2000 *(Basis: gerätebezogene Emissionsfaktoren und emissionsrelevanter Endenergieverbrauch)*

Partikel	Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	498	20	517	55	48	103	553	68	620
Steinkohlen	*55*	-	*55*	*55*	*48*	*103*	*110*	*48*	*158*
Steinkohlenbriketts	*442*	*20*	*462*	-	-	-	*442*	*20*	*462*
Steinkohlenkoks	124	20	144	36	11	47	160	31	191
Braunkohlenbriketts	865	994	1.859	-	-	-	865	994	1.859
Rheinisch	*865*			-	-				
Lausitzer		*679*			-				
Mitteldeutsche		*153*			-				
Importe (Böhmische)		*162*			-				
Brennholz	13.977	5.108	19.085	2.253	713	2.966	16.230	5.821	22.051
naturbelassenes Holz	*13.977*	*5.108*	*19.085*						
*naturbelassenes Holz **				*1.846*	*551*	*2.397*			
Holzwerkstoffe				*407*	*162*	*568*			
Heizöl EL	1.110	125	1.235	371	66	436	1.481	190	1.671
Summe	**16.574**	**6.266**	**22.840**	**2.715**	**837**	**3.552**	**19.288**	**7.104**	**26.392**

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern
leeres Feld kein anteiliger Endenergieverbrauch angesetzt, deshalb wurden keine Emissionsfaktoren ermittelt
\- Brennstoff wird derzeit in diesen Bereichen nicht eingesetzt
aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Zum Vergleich mit dem aktuellen Emissionsaufkommen für Partikel sind in **Tabelle 7.2** die Werte aus dem Emissionsfaktoren-Vorhaben (Pfeiffer et al., 2000) für das Jahr 1995 aufgeführt.

Tabelle 7.2: Emissionsaufkommen für Partikel in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Jahr 1995 (nach Pfeiffer et al., 2000)

Partikel	Emissionsaufkommen in t im Jahr 1995								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	5.441	109	5.550	2.024	1.677	3.701	7.465	1.786	9.251
Steinkohlen	*3.525*	-	*3.525*	*2.024*	*1.677*	*3.701*	*5.549*	*1.677*	*7.226*
Steinkohlenbriketts	*1.916*	*109*	*2.025*	-	-	-	*1.916*	*109*	*2.025*
Steinkohlenkoks	164	27	191	66	16	82	230	42	272
Braunkohlenbriketts	1.911	3.507	5.418	-	908	908	1.911	4.414	6.326
Rheinisch	*1.911*			-					
Lausitzer		*890*			*391*				
Mitteldeutsche		*1.130*			*271*				
Importe (Böhmische)		*1.486*			*245*				
Brennholz	2.459	997	3.457	944	214	1.158	3.404	1.211	4.615
naturbelassenes Holz	*2.459*	*997*	*3.457*						
*naturbelassenes Holz **				*713*	*154*	*867*			
Holzwerkstoffe				*231*	*60*	*291*			
Heizöl EL	1.436	78	1.514	486	69	555	1.922	147	2.069
Summe	**11.413**	**4.717**	**16.130**	**3.520**	**1.975**	**5.496**	**14.933**	**7.600**	**22.533**

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern

leeres Feld kein anteiliger Endenergieverbrauch angesetzt, deshalb wurden keine Emissionsfaktoren ermittelt

\- Brennstoff wird derzeit in diesen Bereichen nicht eingesetzt

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Bei Kohlenbrennstoffen nimmt das Emissionsaufkommen an Partikeln, vor allem durch den Rückgang der in Haushalten und bei Kleinverbrauchern verfeuerten Mengen, von 1995 bis 2000 deutlich ab. Bei Heizöl EL ist ebenfalls ein Rückgang des Emissionsaufkommens in diesem Zeitraum feststellbar, der auch hier durch einen reduzierten Heizölverbrauch verursacht wird. Aufgrund des angestiegenen Brennstoffeinsatzes bei Holzbrennstoffen und teilweise höherer Emissionsfaktoren für das Jahr 2000, vor allem für Feuerungen im Haushaltsbereich, wurde in dem betrachteten Zeitraum ein deutlicher Anstieg des Partikelaufkommens ermittelt.

In **Tabelle 7.3** ist das ermittelte Emissionsaufkommen für die Partikelfraktionen PM_x der Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher enthalten. Eine vollständige Zusammenstellung des gerätebezogenen Aufkommens der verschiedenen Partikelfraktionen ist in **Anhang B** aufgeführt. Das berechnete sektorale Emissionsaufkommen für die Partikelfraktionen ist in **Anhang C** enthalten.

Tabelle 7.3: Emissionsaufkommen für die Partikelfraktionen PM_x in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Bezugsjahr 2000

Partikelfraktion PM_1	Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	486	19	505	47	41	88	533	60	593
Steinkohlen	*47*	-	*47*	*47*	*41*	*88*	*94*	*41*	*135*
Steinkohlenbriketts	*439*	*19*	*458*	-	-	-	*439*	*19*	*458*
Steinkohlenkoks	123	20	143	36	11	46	158	31	189
Braunkohlenbriketts	679	837	1.516	-	-	-	679	837	1.516
Rheinisch	*679*			-	-				
Lausitzer		*604*			-				
Mitteldeutsche		*118*			-				
Importe (Böhmische)		*116*			-				
Brennholz	11.846	4.365	16.211	1.688	518	2.206	13.535	4.883	18.417
naturbelassenes Holz	*11.846*	*4.365*	*16.211*						
*naturbelassenes Holz **				*1.419*	*410*	*1.829*			
Holzwerkstoffe				*269*	*108*	*378*			
Heizöl EL	943	106	1.050	315	56	371	1.258	162	1.420
Summe	**14.077**	**5.348**	**19.425**	**2.086**	**625**	**2.712**	**16.163**	**5.973**	**22.136**

Partikelfraktion $PM_{2,5}$	Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	492	20	512	50	43	93	542	63	604
Steinkohlen	*50*	-	*50*	*50*	*43*	*93*	*100*	*43*	*143*
Steinkohlenbriketts	*442*	*20*	*462*	-	-	-	*442*	*20*	*462*
Steinkohlenkoks	124	20	144	36	11	47	160	31	191
Braunkohlenbriketts	734	900	1.634	-	-	-	734	900	1.634
Rheinisch	*734*			-	-				
Lausitzer		*632*			-				
Mitteldeutsche		*130*			-				
Importe (Böhmische)		*138*			-				
Brennholz	12.584	4.628	17.212	1.861	576	2.437	14.445	5.204	19.649
naturbelassenes Holz	*12.584*	*4.628*	*17.212*						
*naturbelassenes Holz **				*1.564*	*456*	*2.021*			
Holzwerkstoffe				*297*	*120*	*416*			
Heizöl EL	1.110	125	1.235	371	66	436	1.481	190	1.671
Summe	**15.043**	**5.693**	**20.736**	**2.317**	**695**	**3.013**	**17.361**	**6.388**	**23.749**

Fortsetzung Tabelle 7.3:

Partikelfraktion PM_{10}	Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000								
	Haushalte			Kleinverbraucher			Haushalte und Kleinverbraucher		
	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D	aBL	nBL	D
Steinkohlen und -briketts	496	20	515	53	47	100	549	66	615
Steinkohlen	*54*	*-*	*54*	*53*	*47*	*100*	*107*	*47*	*154*
Steinkohlenbriketts	*442*	*20*	*462*	*-*	*-*	*-*	*442*	*20*	*462*
Steinkohlenkoks	124	20	144	36	11	47	160	31	191
Braunkohlenbriketts	823	960	1.783	-	-	-	823	960	1.783
Rheinisch	*823*			*-*	*-*				
Lausitzer		*663*			*-*				
Mitteldeutsche		*144*			*-*				
Importe (Böhmische)		*154*			*-*				
Brennholz	13.499	4.944	18.443	2.115	665	2.780	15.614	5.609	21.223
naturbelassenes Holz	*13.499*	*4.944*	*18.443*						
*naturbelassenes Holz **				*1.752*	*519*	*2.271*			
Holzwerkstoffe				*363*	*145*	*508*			
Heizöl EL	1.110	125	1.235	371	66	436	1.481	190	1.671
Summe	**16.051**	**6.070**	**22.121**	**2.575**	**787**	**3.363**	**18.627**	**6.857**	**25.483**

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern

aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

8 Minderungspotential und Prognose der Emissionsentwicklung

Gegenüber dem Anteil am Endenergieverbrauch liegt der Emissionsanteil an Produkten unvollständiger Verbrennung bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern installiert sind, überproportional hoch. Während bei Stein- und Braunkohlenbrennstoffen seit Jahren der Verbrauch abnimmt, ist bei Holzbrennstoffen in den nächsten Jahren von einem zunehmenden Energieeinsatz auszugehen. Der verstärkte Einsatz von CO_2-neutralen Holzbrennstoffen wird politisch gefördert und durch entsprechende Maßnahmen (z.B. finanzielle Förderungen) unterstützt. Hierdurch nahm in den letzten Jahren in einigen Bundesländern (z.B. Bayern, Baden-Württemberg) die Anzahl der installierten Feuerungsanlagen im nicht gewerblichen Bereich, vor allem im Leistungsbereich > 100 kW, deutlich zu. Die Diskussionen der letzten Jahre über das Emissionsverhalten von Holzfeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV und die Marktentwicklung führte zu verstärkten Anstrengungen der Hersteller zur Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik.

Derzeit sind in Haushalten in Deutschland überwiegend nur handbeschickte und damit chargenweise betriebene Holzfeuerungsanlagen installiert (siehe auch Kapitel 4.1). Bei Kleinverbrauchern werden sowohl handbeschickte (z.B. in land- und forstwirtschaftlichen Betrieben) als auch mechanisch beschickte Feuerungsanlagen (z.B. in Betrieben des Holz-, Bau- und Ausbaugewerbes sowie dem Glaserhandwerk) genutzt.

In **Tabelle 8.1** sind die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Emissionsfaktoren für Partikel von einigen Einzelfeuerstätten und von handbeschickten Heizkesseln im Vergleich zu Ergebnissen von Emissionsmessungen an hand- und mechanisch beschickten Holzfeuerungen aufgelistet. Die Emissionsfaktoren wurden innerhalb jeder Feuerungsbauart auf Grundlage von Emissionsangaben aus Messungen an Prüfständen und an installierten Feuerstätten unter Berücksichtigung der Betriebsweise und der Altersstruktur der installierten Feuerungen ermittelt. Somit sind diese Werte eigentlich nicht direkt vergleichbar mit den aus Messungen berechneten Mittelwerten und Bandbreiten der Partikelemissionen.

Für Einzelfeuerstätten (Kachelöfen, Kamine und Kaminöfen) die mit Holzbrennstoffen im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben werden, wurden Emissionsfaktoren für Partikel von 34 bis 113 kg/TJ berechnet, wobei die obere Grenze für Feuerstätten gilt, die vor 1990 errichtet wurden.

Handbeschickte Heizkessel weisen Emissionsfaktoren für Partikel von 172 kg/TJ, für Geräte die vor 1990, und 21 kg/TJ, für Geräte die nach 1990 errichtet wurden, auf. Allerdings liegen sowohl bei Einzelfeuerstätten als auch für Heizkessel nur wenige Emissionsdaten für Anlagen vor, die vor 1990 errichtet wurden.

Tabelle 8.1: Mittelwerte und Bandbreiten der Partikelemissionen für Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher beim Betrieb mit Holzbrennstoffen

Feuerung	Datenquelle	Partikel in kg/TJ	
Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen mit Stückholz	in dieser Arbeit berechnete Emissionsfaktoren für den Betrieb im Bereich der Nennwärmeleistung	vor 1990: nach 1991:	**113** **34-84**
handbeschickte Heizkessel mit Stückholz		vor 1990: nach 1991:	**172** **21**
	aus Messungen: Baumbach et al. (1997), Hartmann et al. (1997), Jungmeier et al. (1999) und eigene Messungen, siehe Teil III	Mittelwert aus 92 Angaben: Bandbreite:	**20** 17-33
Pelletöfen (z.B. als Kaminofen)	eigene Messungen, siehe Teil I	**11**	
mechanisch beschickte Heizkessel für Hackschnitzel	Hartmann et al. (1997), Launhardt (1998), Jungmeier et al. (1999), Launhardt et al. (1999) Baumbach et al. (1999), Deines (1999), eigene Messungen, siehe Teil III	Mittelwert aus 160 Angaben: Bandbreite:	**30** 11 - 100
mechanisch beschickte Heizkessel für Holzpellets	Jungmeier et al. (1999) Öko (2001) eigene Messungen, siehe Teil III	Mittelwert aus 57 Angaben: Bandbreite:	**16** 4 - 49
Unterschubfeuerungen mit Resthölzern	Baumbach et al. (1997), Baumbach et al. (1999) eigene Messungen, siehe Teil IV	Mittelwert aus 14 Angaben: Bandbreite:	**50** 32-196
Unterschubfeuerung mit Gewebefilter	eigene Messungen, siehe Teil IV	vor Filter: nach Filter:	**30** **2**

Für die Berechnung der Mittelwerte und Bandbreiten der Partikelemissionen wurden die Ergebnisse von Messungen auf dem Prüfstand und an installierten Holzfeuerungen mit Baujahren zwischen 1993 und 2001 ausgewertet. Für moderne handbeschickte Heizkessel (Nennwärmeleistungen von 20 bis ca. 50 kW) die mit naturbelassenem Scheitholz betrieben werden, wurden als mittlere Partikelemission ein Wert von 20 kg/TJ bei Nennwärmeleistung ermittelt. Die Angaben beruhen zum überwiegenden Teil (91 von 92 Messwerten) auf Prüfstandsmessungen unter definierten Randbedingungen entsprechend den einschlägigen Prüfnormen. Der Maximalwert in Höhe von 33 kg/TJ stammt aus einer Untersuchung an installierten Feuerungsanlagen. Bei Hartmann et al. (1997) werden für handbeschickte Heizkessel, die thermostatisch- bzw. lambda-geregelt sind, als mittlere Partikelemissionen 17 bzw. 22 kg/TJ angegeben. Diese Werte beruhen auf 22 (thermostatisch-geregelt) bzw. 23 (lambda-geregelt) Einzelmessungen.

Bei mechanisch beschickten Holzfeuerungen (Nennwärmeleistungen 40 kW bis ca. 500 kW) die mit naturbelassenem Holz in Form von Hackschnitzel betrieben wurden, ergibt sich als mittlere Partikelemission bei Nennwärmeleistung ein Wert von 30 kg/TJ, bei einer Bandbreite von 11 bis 100 kg/TJ. Die Maximalwerte wurden, ebenfalls wie bei den handbeschickten Heizkesseln, im Rahmen von Untersuchungen an installierten Feuerungen ermittelt.

Pelletfeuerungen, entweder als Pelletöfen mit Nennwärmeleistungen unter 15 kW oder als Pelletkessel mit Nennwärmeleistungen bis 25 kW, weisen relativ geringe mittlere Partikelemissionen in Höhe von 11 bzw. 16 kg/TJ auf.

Für mit Resthölzern befeuerte mechanisch beschickte Feuerungen (Nennwärmeleistungen 100 bis 800 kW) wurden von insgesamt 12 Messwerten lediglich 2 auf dem Prüfstand ermittelt. Die anderen Daten wurden an installierten Anlagen, unter praxisüblichen Bedingungen (z.B. Einstellungen der Feuerungen, Brennstoffe), gemessen. Als mittlere Partikelemission ergibt sich hierbei ein Wert von 50 kg/TJ, der für verschiedene Betriebsbedingungen (reiner Brennbetrieb sowie Brenn- und Gluthaltebetrieb) gilt.

Die Partikelemissionen bei Holzfeuerungen lassen sich sowohl durch Primär- als auch durch Sekundärmaßnahmen reduzieren. Primärseitige Maßnahmen beinhalten eine verbesserte Verbrennungs- und Regelungstechnik, mit der z.B., bedingt durch die Strömungsführung, eine weitgehende Partikelabscheidung bereits im Feuerraum erreicht wird. Abgasseitig lässt sich die Partikelkonzentration durch den Einsatz von wirksamen Staubabscheidern deutlich mindern, wobei neben der Gesamtmasse der emittierten Partikel in etwa proportional auch die Masse der einzelnen Partikelfraktionen (Feinstäube) abnimmt. So wurden bei eigenen Messungen an einer mit Resthölzern betriebenen Unterschubfeuerung nach dem Gewebefilter Partikelkonzentrationen von < 10 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol% O_2) ermittelt.

Die Partikelemissionen von Feuerungsanlagen für Heizöl EL bestehen bei derzeitigem Schwefelgehalt des Brennstoffs zum überwiegenden Teil aus kondensierbaren Partikeln (H_2SO_4). Im Zuge der Novellierung der 3. BImSchV (2001) soll der zulässige Schwefelgehalt in leichtem Heizöl ab dem Jahr 2008 auf 0,1 Massen-% begrenzt werden. Nach den Messergebnissen aus Teil II der Messberichte (siehe dort auch Tabelle 5.6) führt die Reduzierung des Schwefelgehaltes im Heizöl zu einer Minderung der Partikelemission durch geringere H_2SO_4-Konzentrationen im Abgas in der Größenordnung von 30 %. Durch eine weitere Reduzierung des Schwefelgehaltes im Heizöl auf z.B. 0,005 Massen-% (entsprechend 50 ppm) ergibt sich nach den vorliegenden Messergebnissen ein Minderung der Partikelemission gegenüber marktüblichem Heizöl in der Größenordnung von 70 %.

8.1 Prognose der Emissionsentwicklung

In diesem Kapitel wird das Szenario einer möglichen Emissionsentwicklung im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher bis zum Jahr 2020 vorgestellt. Ausgangspunkt ist das ermittelte Emissionsaufkommen für Partikel im Jahr 2000. Der betrachtete Zeitraum für die Prognose erstreckt sich somit über 20 Jahre.

Berücksichtigt wurde in dieser Prognose die vermutete Entwicklung der Endenergieverbräuche, die veränderten Anforderungen an den Schwefelgehalt von leichtem Heizöl und ein höherer Anteil an modernen mechanisch beschickten Holzfeuerungen.

In **Tabelle 8.2** ist die vermutete Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2020 für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher dargestellt. Basis für die Ableitung dieser Verbrauchsentwicklung ist eine Studie der Prognos AG zur Entwicklung der Energiemärkte in Deutschland für die Jahre 1995 bis 2020 (Prognos, 1995).

Tabelle 8.2: Annahme zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher bis zum Jahr 2020

Endenergieverbrauch (Prognose)	**Endenergieverbrauch in TJ in den Jahren 2000 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland**				
	2000	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**
Steinkohlen und -briketts	11.574	8.722	5.151	3.325	2.264
Steinkohlen	*8.574*	*7.337*	*4.319*	*2.772*	*1.865*
Steinkohlenbriketts	*3.000*	*1.385*	*832*	*553*	*398*
Steinkohlenkoks	11.794	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	21.000	5.566	2.835	1.943	1.417
Brennholz	205.384	241.000	246.342	238.625	231.502
Heizöl EL	1.005.426,5	927.985,0	892.302,0	855.070,2	815.949,1
Summe	**1.255.179**	**1.183.273**	**1.146.630**	**1.098.964**	**1.051.132**

Da die in dieser Studie prognostizierten Endenergieverbräuche für das Jahr 2000 zum großen Teil bereits nicht mehr mit den tatsächlichen Gegebenheiten übereinstimmen, können die Prognosewerte nicht direkt übernommen werden. Statt dessen wurde die Entwicklung des Endenergieverbrauchs mit den Daten aus dem Jahr 2000 (siehe auch Tabelle 5.3) und den prozentualen Änderungen von 2000 bis 2020 aus der Prognos-Studie abgeschätzt. Bei Steinkohlenkoks wurde außerdem davon ausgegangen, dass die Auslieferung an Haushalte und Kleinverbraucher ab 2002 eingestellt wurde und statt dessen Steinkohlen (Anthrazit) eingesetzt werden (Lammers, 2001). Ein ausführlicher Überblick über die Ergebnisse der Prognos-Studie sind in (Pfeiffer et al., 2000) enthalten.

Insgesamt ergibt sich nach der Prognose bis zum Jahr 2020 ein stetiger Rückgang des Endenergieverbrauchs in den beiden Verbraucherbereichen, die auch mit einem abnehmenden Verbrauch von Kohlenbrennstoffen und Heizöl EL verbunden sind. Bei Holzbrennstoffen hingegen ist bis zum Ende des Prognosezeitraums mit einem Verbrauchsanstieg zu rechnen.

Durch die Absenkung des Grenzwertes für den Schwefelgehalt im Heizöl EL ab dem Jahr 2008 auf 0,1 Massen-% wird erwartet, dass sich auch der Emissionsfaktor für Partikel um rund 30 % reduziert. Hierbei wird vorausgesetzt, dass dieser Effekt schon ab dem Jahr 2005 zum tragen kommt. Weiterhin wird als eigene optimistische Abschätzung angenommen, dass sich in den Jahren 2010 bis 2020 der Anteil von Heizölqualitäten mit einem Schwefelgehalt von 0,005 Massen-% von 10 auf 70 % erhöht. Für diese Qualitäten wird eine Minderung der Partikelemission gegenüber marktüblichem Heizöl von rund 70 % angesetzt.

Bei Feuerungsanlagen für Holzbrennstoffe wurde bei der Berechnung der Emissionsentwicklung angenommen, dass sich der Anteil von Holzbrennstoffen, die in hand- und vor allem in mechanisch beschickten Anlagen mit relativ geringen Partikelemissionen verfeuert werden, deutlich erhöht.

Dies kann z.B. durch den Ersatz von Feuerungen mit veralteter Verbrennungstechnik durch moderne hand- und mechanisch beschickte Feuerungen, durch die Bestandserweiterung mit im wesentlichen mechanisch beschickten Anlagen und durch eine verstärkte Nutzung von Holzpellets erreicht werden. Durch eine Realisierung dieser Maßnahmen wurde für das Szenario abgeschätzt, dass sich eine Minderung der Partikelemission um 40 % bis zum Jahr 2020 ergeben könnte.

Bei Holzfeuerungen kann anhand der vorliegenden Messergebnisse nicht darauf geschlossen werden, dass eine Minderung der Partikelemission durch die Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik oder durch den verstärkten Einsatz von Holzpellets zu einer deutlichen Änderung der Anteile für die einzelnen Partikelfraktionen führen würde. Lediglich beim Einsatz von Gewebefiltern zeigte sich ein Erhöhung des Anteils an Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von > 10 µm. Beim Szenario wurde ein weit verbreiteter Einsatz von Gewebefiltern allerdings nicht unterstellt. Somit verläuft die Emissionsentwicklung für Partikel und die einzelnen Partikelfraktionen PM_x bei diesen Feuerungsanlagen im gleichen Verhältnis. Bei Ölfeuerungen erfolgt durch die Abnahme des kondensierbaren Anteils am Partikelaufkommen eine gewisse Verschiebung der Partikelverteilung zwischen den Fraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ (siehe Tabelle 6.1 im Teil II der Messberichte). Auf die Partikelfraktion PM_{10} wirkt sich dies aber nicht aus. Deshalb soll auf eine separate Darstellung der Emissionsentwicklung für die Partikelfraktionen verzichtet werden.

Tabelle 8.3 zeigt die mit den oben genannten Annahmen neu berechneten sektoralen Emissionsfaktoren für Partikel vom Jahr 2005 bis 2020. Im Vergleich hierzu sind die derzeitigen Emissionsfaktoren für das Jahr 2000 aus Tabelle 6.3 ebenfalls mit aufgeführt.

Mit den Prognosen zum Endenergieverbrauch und zu den Emissionsfaktoren ergibt sich die in **Tabelle 8.4** aufgeführte Entwicklung des Emissionsaufkommens für Partikel bis 2020.

Tabelle 8.3: Entwicklung der sektoralen Emissionsfaktoren für Partikel der Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland bis zum Jahr 2020

Partikel (Prognose)	Emissionsfaktoren in kg/TJ in den Jahren 2000 bis 2020 Haushalte in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	86	86	86	86	86
Steinkohlen	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*
Steinkohlenbriketts	*154*	*154*	*154*	*154*	*154*
Steinkohlenkoks	16	16	16	16	16
Braunkohlenbriketts	89	89	89	89	89
Brennholz - Prognose 1	116	116	116	116	116
Brennholz - Prognose 2	116	104	100	93	69
Heizöl EL	1,7	1,1	1,0	0,9	0,7

Partikel (Prognose)	Emissionsfaktoren in kg/TJ in den Jahren 2000 bis 2020 Kleinverbraucher in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	18	18	18	18	18
Steinkohlen	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*
Steinkohlenbriketts	-	-	-	-	-
Steinkohlenkoks	17	17	17	17	17
Braunkohlenbriketts	-	-	-	-	-
Brennholz - Prognose 1	73	73	73	73	73
Brennholz - Prognose 2	73	66	64	59	44
Heizöl EL	1,7	1,1	1,0	0,9	0,7

Partikel (Prognose)	Emissionsfaktoren in kg/TJ in den Jahren 2000 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	54	54	54	54	54
Steinkohlen	*18*	*18*	*18*	*18*	*18*
Steinkohlenbriketts	*154*	*154*	*154*	*154*	*154*
Steinkohlenkoks	16	16	16	16	16
Braunkohlenbriketts	89	89	89	89	89
Brennholz - Prognose 1	107	107	107	107	107
Brennholz - Prognose 2	107	97	93	86	64
Heizöl EL	1,7	1,1	1,0	0,9	0,7

Prognose 1: keine zeitliche Entwicklung für die Emissionsfaktoren angenommen
Prognose 2: Bestand von Holzfeuerungen mit geringen Partikelemissionen (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) nimmt deutlich zu

Tabelle 8.4: Entwicklung des Emissionsaufkommens für Partikel aus Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland bis zum Jahr 2020

Partikel (Prognose)	Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2000 bis 2020 Haushalte in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	517	321	193	128	91
Steinkohlen	*55*	*103*	*62*	*41*	*29*
Steinkohlenbriketts	*462*	*218*	*131*	*87*	*62*
Steinkohlenkoks	144	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	1.859	494	252	173	126
Brennholz - Prognose 1	19.085	22.395	22.891	22.174	21.512
Brennholz - Prognose 2	19.085	20.155	19.839	17.739	12.907
Heizöl EL	1.235	766	692	537	394
Summe Prognose 1	**22.840**	**23.976**	**24.029**	**23.012**	**22.123**
Summe Prognose 2	**22.840**	**21.737**	**20.976**	**18.577**	**13.518**

Partikel (Prognose)	Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2000 bis 2020 Kleinverbraucher in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	103	28	16	9	4
Steinkohlen	*103*	*28*	*16*	*9*	*4*
Steinkohlenbriketts	-	-	-	-	-
Steinkohlenkoks	47	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	-	-	-	-	-
Brennholz - Prognose 1	2.966	3.480	3.557	3.446	3.343
Brennholz - Prognose 2	2.966	3.132	3.083	2.757	2.006
Heizöl EL	436	267	243	191	142
Summe Prognose 1	**3.552**	**3.775**	**3.817**	**3.646**	**3.489**
Summe Prognose 2	**3.552**	**3.427**	**3.343**	**2.957**	**2.152**

Partikel (Prognose)	Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2000 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland				
	2000	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	620	349	209	136	95
Steinkohlen	*158*	*130*	*78*	*49*	*33*
Steinkohlenbriketts	*462*	*218*	*131*	*87*	*62*
Steinkohlenkoks	191	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	1.859	494	252	173	126
Brennholz - Prognose 1	22.051	25.875	26.449	25.620	24.855
Brennholz - Prognose 2	22.051	23.287	22.922	20.496	14.913
Heizöl EL	1.671	1.033	935	729	535
Summe Prognose 1	**26.392**	**27.751**	**27.845**	**26.658**	**25.612**
Summe Prognose 2	**26.392**	**25.164**	**24.319**	**21.534**	**15.670**

Prognose 1: keine zeitliche Entwicklung für die Emissionsfaktoren angenommen
Prognose 2: Bestand von Holzfeuerungen mit geringen Partikelemissionen (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) nimmt deutlich zu

Aufgrund des stark abnehmenden Brennstoffeinsatz nehmen die Anteile und die Absolutwerte des Partikelaufkommens bei Kohlenbrennstoffen bis zum Ende des Prognosezeitraumes stark ab. Dies gilt auch für das Partikelaufkommen aus Feuerungen für leichtes Heizöl.

Insgesamt wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens vom zunehmenden Verbrauch an Holzbrennstoffen und dem prognostizierten Verlauf der Emissionsfaktoren für diese Feuerungen bestimmt. Wird keine wesentliche Änderung im Emissionsverhalten des Gerätebestandes bis zum Jahr 2020 angenommen (d.h. Emissionsfaktor bleibt unverändert), nehmen die Partikelemissionen aus Holzfeuerungen zu (Prognose 1). Bei einem stark zunehmenden Bestand an Holzfeuerungen mit relativ geringen Partikelemissionen (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) würde sich trotz des zunehmenden Holzverbrauchs ein deutlicher Rückgang der Partikelemissionen ergeben.

9 Zusammenfassung

In diesem Vorhaben wurden neue Emissionsfaktoren und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland ermittelt. Die Partikelemissionen wurden differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und der Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}. Dazu wurden Partikelmessungen auf dem Prüfstand an Einzelfeuerstätten (Dauerbrandofen, Heizeinsatz für Kachelöfen, Kamineinsatz und Kaminofen), Heizkesseln (zwei Stückholzkessel, Hackgutfeuerung und Kessel-Pelletfeuerung) und Anlagen der Kleinverbraucher (Unterschubfeuerungen) sowie an installierten Anlagen der Kleinverbraucher (zwei Vorschubrostfeuerungen) durchgeführt. Ergänzend wurden auch bisher durchgeführte eigene Untersuchungen verwendet und Literaturangaben ausgewertet.

Außerdem wurde das Emissionsverhalten und die Partikelemissionen von zwei Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern beim Einsatz von leichten Heizölen mit unterschiedlichen Schwefelgehalten und bei Zusatz eines ferrocenhaltigen Additivs auf dem Prüfstand untersucht.

Die Partikelemission einer Emissionsquelle kann sich aus Partikeln zusammensetzen, die als solche emittiert werden und aus solchen Stoffen, die unmittelbar nach Verlassen der Emissionsquelle in unmittelbarer Umgebung des Schornsteins als Partikel vorliegen. In diesem Fall bestehen die Partikelemissionen aus einem filterbaren und einem kondensierbaren Anteil.

Dies ist bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und ungünstigen Verbrennungsbedingungen der Fall, deren Abgase organische Verbindungen enthalten, welche bei Umgebungstemperatur kondensieren und dann in flüssiger oder fester Form vorliegen. Ebenso ist z.B. bei Ölfeuerungen zwischen filterbaren und kondensierbaren Anteilen an den Partikelemissionen zu unterscheiden, wenn Schwefelverbindungen im Brennstoff enthalten sind. Denn ein geringer Teil des Brennstoffschwefels wird zu Schwefeltrioxid (SO_3) oxidiert, welches sich mit dem im Abgas vorhandenen Wasserdampf zu Schwefelsäure (H_2SO_4) umsetzt, die unterhalb des Schwefelsäuretaupunktes kondensiert.

Um sowohl die filterbaren als auch kondensierbaren Partikel bei den Einzelfeuerstätten und bei einem Stückholzkessel mit veralteter Verbrennungstechnik zu erfassen, erfolgte die Partikelprobenahme im verdünnten und abgekühlten Abgas. Somit können die im heißen Abgas aus filter- und kondensierbaren Anteile bestehenden Partikel im verdünnten Abgas gemeinsam in Form filterbarer Partikel abgeschieden werden.

Aufgrund der guten Verbrennungsbedingungen und den damit verbundenen geringen Partikelkonzentrationen würde bei den untersuchten Ölfeuerungen eine Verdünnung des Abgases zu unvertretbar langen Probenahmezeiten führen. Deshalb erfolgt hier die Probenahme zur Bestimmung der filterbaren Partikel im unverdünnten Abgas. Der kondensierbare Anteil der Partikelemission in Form von SO_3 (bzw. H_2SO_4) im Abgas wird durch die Messung der H_2SO_4-Konzentration erfasst. Bei dieser Messung kann eine Fraktionierung der kondensier-

ten Partikel nicht vorgenommen werden. Deshalb erfolgte in diesem Fall eine Berechnung der Partikelfraktionen PM_x anhand von Literaturangaben über die Größenverteilung von kondensierter Schwefelsäure in unmittelbarer Nähe einer Emissionsquelle.

In den ausgewerteten Literaturstellen erfolgte die Partikelprobenahme bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe mit erhöhten Konzentrationen von kondensierbaren organischen Verbindungen im Abgas dagegen meist bei höheren oder nicht dokumentierten Abgastemperaturen. Auch in Literaturangaben zur Partikelemission von Feuerungen für Heizöl EL erfolgte in der Regel keine parallele Bestimmung von filter- und kondensierbaren Partikeln. Dies mindert z.T. die Vergleichbarkeit von Literaturdaten untereinander und zu den eigenen durchgeführten Untersuchungen. Um die Datenbasis für die Berechnung der Partikelemissionen nicht zu stark einzuschränken, wurden aber trotzdem alle vorliegenden Messwerte zur Ermittlung der Emissionsfaktoren verwendet.

Das Emissionsaufkommen für Partikel wird im Jahr 2000 für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher im wesentlichen durch die Verbrennung von festen Brennstoffen in Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV bestimmt. Rund 94 % des berechneten Partikelaufkommens werden durch diese Feuerungen verursacht.

Bei den Feuerungen für Heizöl EL liegt der Anteil der Partikelfraktionen PM_1 und PM_{10} zwischen 88 und 100 % an der gesamten Partikelemission. Für feste Brennstoffe liegen die Anteile der Partikelfraktionen PM_1 und PM_{10} zwischen 64 und 99 %. Bei Einzelfeuerstätten sind die Anteile der Partikelfraktionen vor allem vom eingesetzten Brennstoff und nur wenig von den Verbrennungsbedingungen und der Gerätekonstruktion abhängig. Die Anteile der Partikelfraktionen bei Ölfeuerungen hängen vom Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes und damit von der H_2SO_4- (bzw. SO_3-) Konzentration im Abgas ab, die auch insgesamt die Höhe der Partikelemission wesentlich beeinflusst. Bei hand- und mechanisch beschickten Holzkesseln wirken sich neben dem eingesetzten Brennstoff auch die Wärmeleistung und ggf. vorhandene Abgasreinigungseinrichtungen (z.B. Gewebefilter) auf die Partikelverteilung aus.

Das Minderungspotential für Partikel und die zukünftige Emissionsentwicklung für den Haushalts- und Kleinverbraucherbereich wurde anhand eines Szenarios bis zum Jahr 2020 abgeschätzt. Hierbei wurde angenommen, dass der Einsatz von Kohlenbrennstoffen in diesen Bereichen weiter rückläufig ist, der Schwefelgehalt im leichten Heizöl ab 2008 auf 0,1 Massen-% reduziert und eine zweite Heizölqualität mit einem noch geringeren Schwefelgehalt von 0,005 Massen-% einen zunehmenden Markanteil erlangt und der Verbrauch an Holzbrennstoffen weiter ansteigt. Der abnehmende Kohleneinsatz und der reduzierte Schwefelgehalt im leichten Heizöl führen zu einem Rückgang des Partikelaufkommens aus diesen Anlagen. Damit wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens vom Verbrauch an Holzbrennstoffen und den prognostizierten Emissionsfaktoren für diese Feuerungen bestimmt.

10 Literatur

1. BImSchV. 2001. (neuste Fassung)
Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

1. BImSchV. 1996. (in diesem Vorhaben herangezogene Fassung)
Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen - 1. BImSchV) in der Fassung vom 7. August 1996, Bekanntmachung: 14. März 1997 (BGBl. I, S. 490).

3. BImSchV. 2001.
Dritte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Schwefelgehalt von leichtem Heizöl und Dieselkraftstoff- 3. BImSchV) vom 15. Jan. 1975, zuletzt geändert am 26. Sept. 1994 (BGBl. I, S. 2640), Beschluss des Bundeskabinetts zur Novellierung der Verordnung vom 10. Okt. 2001.

AGEB. 2002.
Tabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland von 1990 bis 2000. Stand 20. Juli 2001 sowie ergänzende Mitteilungen von Herrn Wittke zum Holzverbrauch in Haushalten und bei Kleinverbrauchern., Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Berlin.

Baumbach, G., Zuberbühler, U., Siegle, V. und Hein, K.R.G. 1997.
Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen. Reihe "Umweltforschung in Baden-Württemberg", ecomed-Verlag, Landsberg.

Baumbach, G.; Zuberbühler, U.; Struschka, M.; Straub, D.; Hein, K.R.G. sowie UMEG.1999 .
Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen. UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen Karlsruhe und Universität Stuttgart. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Abt. Reinhaltung der Luft, Bericht Nr. 44.

Corio L.A. und Sherwell, J. 2000.
In stack condensible particulate matter measurement and issues, Air & Waste Manag. Assoc., Vol. 50, S. 207-218.

Deines, T. 1999.
Messergebnisse aus Abnahmemessungen des Schornsteinfegerhandwerks von geförderten Holzfeuerungen (Förderzeitraum 1995-1998) in Baden-Württemberg. Persönliche Mitteilung. Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Stuttgart.

Hartmann, H.; Launhardt, T.; Schmid, H. 1997.
Technische Möglichkeiten und umweltrelevante Auswirkungen der Kombination von Holz- und Gasfeuerungen kleiner Leistung. Landtechnik Forschungsbericht Heft 1, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan der Technischen Universität München, Freising.

Hüglin, Ch. 2000.
Anteil des Straßenverkehrs an den PM10- und PM2,5-Imissionen. Chemische Zusammensetzung des Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell. Bericht C4, Verkehr und Umwelt, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Schweiz.

Jungmeier, G.; Golja, F.; Spitzer, J. 1999.
Der technische Fortschritt bei Holzfeuerungen. Ergebnisse einer statistischen Analyse der Prüfstandsmessungen der BLT Wieselburg von 1980-1998. (Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, in der Schriftenreihe des BMUJF Band 11/1999). Institut für Energieforschung, Graz, Österreich.

Kohlenwirtschaft. 2001.
Kohlenabsatz-Statistiken für Braunkohlen und Braunkohlenprodukte. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., Essen.

Lammers. 2001.
Persönliche Mitteilung von Herrn Lammers zum Auslaufen der Koksproduktion für die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern eingesetzten Körnungen. Ersatzbrennstoff: Anthrazit. DSK Anthrazit Ibbenbüren GmbH, Ibbenbüren.

Launhardt, T. 1998.
Erfahrungen mit Klein-Holzfeuerungen in Prüfstandsmessungen und Ansätze zur Optimierung von Feuerungstechnik und Betrieb. Tagungsband zum 3. Kolloquium Klein-Holzfeuerungen, ENET, Bern, Schweiz.

Launhardt, T.; Hartmann, H. und Link, H. 1999.
Emissionsmessungen an 21 bayerischen Zentralheizungsanlagen für Holzhackgut. Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan der Technischen Universität München, Freising.

Öko. 2001.
Marktübersicht Pelletheizungen. Persönliche Mitteilung von Frau Riemer der Ergebnisse eine Erhebung bei Herstellern von Pelletkesseln. Öko Test Verlag, Frankfurt am Main.

Pfeiffer, F., Struschka, M. und Baumbach, G. 2000.
Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 14-00, Umweltbundesamt, Berlin.

Prognos. 1995.
Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Prognos AG - Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung, Basel, Schweiz.

Rheinbraun. 2002.
Angaben zum Bestand an installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe. Persönliche Mitteilung von Herrn Zollner. Rheinbraun Brennstoff GmbH, Frechen.

Struschka, M., Straub, D., Pfeiffer, F. und Baumbach, G. 2001.
Untersuchung der Feinstaubemissionen einer Kleinfeuerungsanlage mittels Simulation der Ableitungs- und Austrittsbedingungen der Rauchgase. Erschienen in der Reihe IVD-Berichte als Nr. 46. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart.

VDI 2066.
Blätter 1 bis 3 und 5: Messen von Partikeln. VDI Handbuch Reinhaltung der Luft. Beuth Verlag GmbH, Berlin, jeweils aktuellste Fassung.

VDI 3491, Blatt 1. 1980.
Messen von Partikeln. Kennzeichnung von Partikeldispersionen in Gasen. Begriffe und Definitionen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

ZIV. 2002.
Erhebungsdaten des Schornsteinfegerhandwerks über Emissionsmessungen im Jahr 2000. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband, Sankt Augustin.

Anhang A - Gerätebezogener Endenergieverbrauch (D)

Für Haushalte und Kleinverbraucher wird in diesem Anhang der in Kapitel 5.2 ermittelte emissionsrelevante und strukturiert nach Gerätegruppen und Leistungsbereichen angegebene Endenergieverbrauch der alten und neuen Bundesländer zusammengefasst für Deutschland aufgelistet. Nachfolgend sind die Tabellen der gerätebezogenen Endenergieverbräuche entsprechend der Systematik in Kapitel 5 (für Erläuterungen siehe dort) aufgeführt.

Haushalte - Ölfeuerungen

Tabelle A1: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der in Haushalten installierten Ölfeuerungen in Deutschland im Jahr 2000

Ölfeuerungen in Haushalten	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1.000 Stück]	jährliche Vollbenutzungsstunden [h]	mittlere Nennwärmeleistung [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Deutschland						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	1.569,9	450	8	20.346	2,7
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	2.247,1	1.147	20	185.616	24,8
	> 25 - 50	2.938,5	1.263	28	374.949	50,1
	> 50	382,8	1.000	121	167.102	22,3
Summe	> 4	7.138,3			748.013	100,0

Kleinverbraucher - Ölfeuerungen

Tabelle A2: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der bei Kleinverbrauchern installierten Ölfeuerungen in Deutschland im Jahr 2000

Ölfeuerungen bei Kleinverbrauchern	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1.000 Stück]	jährliche Vollbenutzungsstunden [h]	mittlere Nennwärmeleistung [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Deutschland						
Ölöfen mit Verdampfungsbrennern	> 4	36,3	350	9	412	0,2
Heizkessel mit Ölgebläsebrennern	4 - 25	140,6	1.150	20	11.843	4,6
	> 25 - 50	221,1	1.109	32	28.504	11,0
	> 50	392,9	1.115	137	217.356	84,2
Summe	> 4	790,8			258.115	100,0

Haushalte - Feuerstätten für feste Brennstoffe

Tabelle A3: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der in Haushalten installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in Deutschland im Jahr 2000

Feuerstätten für feste Brennstoffe in Haushalten Deutschland	Leistungs-bereich	Anlagen-bestand	jährliche Voll-benutzungs-stunden	mittlere Nennwärme-leistung	gerätebezogener Endenergie-verbrauch	
	[kW]	[1.000 St.]	[h]	[kW]	[TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	347,6	941	19	21.931	10,9
	> 25 - 50	231,4	947	33	25.954	12,9
	> 50	52,4	947	55	9.819	4,9
Dauerbrandöfen	< 15	2.326,5	520	5,7	24.615	12,2
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	2.841,0	250	7,5	19.177	9,5
Kaminöfen	< 15	2.436,5	315	7,5	20.722	10,3
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	4.165,0	634	7,9	75.165	37,3
Badeöfen	< 15	199,1	110	5	394	0,2
Herde	< 15	1.563,0	130	5	3.657	1,8
Summe	> 4	14.162,4			201.435	100

Feuerstätten für feste Brennstoffe Deutschland	Leistungs-bereich	EEV	davon [1]									
			BKB		Steinkohlen		SKB		SKK		naturbel. Holz	
	[kW]	[TJ]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	21.931	2.134	10,2	228	7,6	-	-	231	2,6	19.339	11,7
	> 25 - 50	25.954	1.664	7,9	345	11,4	-	-	167	1,9	23.778	14,4
	> 50	9.819	794	3,8	116	3,9	-	-	83	0,9	8.826	5,3
Dauerbrandöfen	< 15	24.615	1.777	8,5	1.883	62,5	1.702	56,8	6.718	74,7	12.536	7,6
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	19.177	1.819	8,7	-	-	192	6,4	-	-	17.165	10,4
Kaminöfen	< 15	20.722	1.975	9,4	-	-	194	6,5	-	-	18.553	11,2
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	75.165	10.008	47,7	441	14,6	859	28,7	1.799	20,0	62.058	37,5
Badeöfen	< 15	394	88	0,4	-	-	-	-	-	-	306	0,2
Herde	< 15	3.657	734	3,5	-	-	49	1,6	-	-	2.874	1,7
Summe	> 4	201.435	20.993	100	3.013	100	2.995	100	8.997	100	165.436	100

[1] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen

'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz

EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch

BKB Braunkohlenbriketts SKB Steinkohlenbriketts SKK Steinkohlenkoks

Kleinverbraucher - Feuerstätten für feste Brennstoffe

Tabelle A4: Gerätebezogene Endenergieverbräuche der bei Kleinverbrauchern installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe in Deutschland im Jahr 2000

Feuerstätten für feste Brennstoffe bei Kleinverbrauchern Deutschland	Leistungsbereich [kW]	Anlagenbestand [1.000 St.]	jährliche Vollbenutzungsstunden [h]	mittlere Nennwärmeleistung [kW]	gerätebezogener Endenergieverbrauch [TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen, ohne gewerbliche Holzfeuerungen)	4 - 25	3,3	963	24	275	1,5
	> 25 - 50	11,5	1.706	44	3.089	17,4
	> 50	3,9	2.634	134	10.994	61,8
Dauerbrandöfen	< 15	23,5	537	5,8	264	1,5
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	29,0	160	7,5	125	0,7
Kaminöfen	< 15	43,5	230	7,5	270	1,5
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	135,0	537	8,5	2.220	12,5
Badeöfen	< 15	10,9	110	5	22	0,1
Herde	< 15	187,0	162	5	544	3,1
Summe 1	> 4	447,6			17.803	100
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [1])						
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	19,1	2.750	78	14.675	48,6
Unterschubfeuerungen	> 50	2,9	2.950	149	4.580	15,2
Vorofenfeuerungen	> 50	4,0	2.950	108	4.648	15,4
Einblasfeuerungen	> 50	2,9	2.950	206	6.315	20,9
Summe 2	> 50	28,9			30.218	100
Summe 1 und 2		476,5			48.021	

Fortsetzung Tabelle A4:

Feuerstätten für feste Brennstoffe Deutschland	Leistungs-bereich	EEV	davon [2]							
			Steinkohlen		Steinkohlen-koks		naturbel. Holz		Holzwerk-stoffe	
	[kW]	[TJ]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]	[TJ]	[%]
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 - 25	275	0	0,0	0	0,0	275	2,9	-	-
	> 25 - 50	3.089	47	0,8	30	1,1	3.013	31,6	-	-
	> 50	10.994	5.358	96,9	2.581	93,9	3.057	32,1	-	-
Dauerbrandöfen	< 15	264	125	2,3	139	5,0	0	0,0	-	-
Kamine (mit off. od. geschl. Feuerraum)	< 15	125	-	-	-	-	125	1,3	-	-
Kaminöfen	< 15	270	-	-	-	-	270	2,8	-	-
Kachelöfen (mit Heizeinsatz od. als Grundofen)	< 15	2.220	0	0	0	0,0	2.220	23,3	-	-
Badeöfen	< 15	22	-	-	-	-	22	0,2	-	-
Herde	< 15	544	-	-	-	-	544	5,7	-	-
Summe	> 4	17.803	5.530	100	2.750	100	9.525	100	-	-
gewerbliche Holzfeuerungen (Resthölzer [1])										
Heizkessel-Schachtfeuerungen	> 50	14.675	-	-	-	-	11.444	48,5	3.228	48,7
Unterschubfeuerungen	> 50	4.580	-	-	-	-	3.584	15,2	1.004	15,1
Vorofenfeuerungen	> 50	4.648	-	-	-	-	3.627	15,4	1.004	15,1
Einblasfeuerungen	> 50	6.315	-	-	-	-	4.934	20,9	1.393	21,1
Summe	> 50	30.218	-	-	-	-	23.589	100	6.629	100

[1] Resthölzer setzen sich aus naturbelassenem Holz und Holzwerkstoffen zusammen
[2] bei Kohlenbrennstoffen einschließlich Importen
'-' Brennstoffe nur bedingt oder nicht geeignet, deshalb kein Energieeinsatz
'0' Energieeinsatz kann nicht ausgewiesen werden
EEV emissionsrelevanter Endenergieverbrauch
Anmerkung zu nicht aufgeführten Braunkohlen- und Steinkohlenbriketts: kein Energieeinsatz

Anhang B - Gerätebezogene Emissionsfaktoren und -aufkommen

Inhaltsübersicht zu Anhang B

Seiten

Zusammenstellung der berechneten gerätebezogenen Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens ..... 62 - 94

Holzbrennstoffe ..... 63 - 69

Braunkohlenbrennstoffe ..... 70 - 76

Steinkohlenbrennstoffe ..... 77 - 90

Heizöl EL ..... 91 - 94

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz	Dauerbrandöfen	< 15	9,3	72	66	68	71	11.029	789	723	755	779
	Kachelöfen	< 15	31,4	112	102	107	110	37.333	4.169	3.821	3.989	4.116
	Kamine	< 15	12,9	160	146	153	158	15.290	2.439	2.236	2.334	2.408
	Kaminöfen	< 15	13,0	115	105	110	113	15.440	1.768	1.621	1.692	1.746
	Heizkessel	4 - 25	10,4	23	17	18	22	12.362	289	205	227	267
		> 25	21,0	174	123	137	160	24.994	4.343	3.075	3.414	4.004
	Badeöfen	< 15	0,1	76	70	73	75	145	11	10	11	11
	Herde	< 15	1,9	77	71	74	76	2.207	170	156	162	168
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte / Summe			**100,0**	**118**	**100**	**106**	**114**	**118.800**	**13.977**	**11.846**	**12.584**	**13.499**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz	Dauerbrandöfen	< 15	3,2	72	66	68	71	1.467	105	96	100	104
	Kachelöfen	< 15	53,2	113	103	108	111	24.588	2.776	2.545	2.656	2.741
	Kamine	< 15	3,9	160	146	153	158	1.820	290	266	278	287
	Kaminöfen	< 15	6,6	115	105	110	113	3.057	350	321	335	346
	Heizkessel	4 - 25	15,0	23	17	18	22	6.932	162	115	128	150
		> 25	16,3	181	128	142	167	7.518	1.362	964	1.071	1.256
	Badeöfen	< 15	0,3	76	70	73	75	161	12	11	12	12
	Herde	< 15	1,4	77	71	74	76	658	51	46	48	50
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte / Summe			**100,0**	**111**	**94**	**100**	**107**	**46.200**	**5.108**	**4.365**	**4.628**	**4.944**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz und Restholz (ohne Holzwerk-stoffe)	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	72	66	68	71	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kachelöfen	< 15	6,6	112	102	107	110	2.054	229	210	220	227
	Kamine	< 15	0,4	160	146	153	158	125	20	18	19	20
	Kaminöfen	< 15	0,9	115	105	110	113	276	32	29	30	31
	Badeöfen	< 15	0,3	76	70	73	75	100	8	7	7	8
	Herde	< 15	2,6	77	71	74	76	802	62	57	59	61
	Heizkessel in	4 - 25	0,8	23	17	18	22	251	6	4	5	5
	Land-/Forstwirt.	> 25	13,5	174	123	137	160	4.184	727	515	571	670
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	28,3	21	15	16	19	8.769	180	128	142	166
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	12,2	63	49	55	61	3.782	239	185	209	231
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	8,9	63	49	55	61	2.745	173	134	152	168
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	9,0	62	48	54	60	2.778	171	132	150	166
		Summe						**25.865**	**1.846**	**1.419**	**1.564**	**1.752**
Holzwerkstoffe	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	8,0	54	39	43	50	2.477	135	95	106	124
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	3,5	104	67	73	92	1.071	112	71	78	98
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,5	104	67	73	92	770	80	51	56	71
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,5	104	67	73	91	770	80	51	56	70
		Summe						**5.087**	**407**	**269**	**297**	**363**
Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher / Summe			**100,0**	**73**	**55**	**60**	**68**	**30.952**	**2.253**	**1.688**	**1.861**	**2.115**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren				Endenergie-verbrauch	Emissionsaufkommen Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ							
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz und Restholz (ohne Holzwerk-stoffe)	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	72	66	68	71	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kachelöfen	< 15	2,2	113	103	108	111	211	24	22	23	23
	Kamine	< 15	0,0	160	146	153	158	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kaminöfen	< 15	0,0	115	105	110	113	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Badeöfen	< 15	0,1	76	70	73	75	6	0,5	0,4	0,5	0,5
	Herde	< 15	0,7	77	71	74	76	62	5	4	5	5
	Heizkessel in	4 - 25	0,4	23	17	18	22	37	0,9	0,6	0,7	0,8
	Land-/Forstwirt.	> 25	14,8	181	128	142	167	1.394	253	179	199	233
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	31,0	24	17	19	22	2.926	70	50	55	65
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	13,4	66	51	58	64	1.260	84	65	74	81
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	9,7	66	51	58	64	918	61	47	54	59
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	9,9	58	45	51	56	929	54	42	47	52
		Summe						**7.744**	**551**	**410**	**456**	**519**
Holzwerkstoffe	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	8,7	87	62	68	80	822	72	51	56	66
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	3,7	104	67	73	92	352	37	24	26	32
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,7	104	67	73	92	256	27	17	19	23
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,7	104	67	73	91	256	27	17	19	23
		Summe						**1.687**	**162**	**108**	**120**	**145**
Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher / Summe			**100,0**	**76**	**55**	**61**	**70**	**9.432**	**713**	**518**	**576**	**665**

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes	Dauerbrandöfen	< 15	7,6	72	66	68	71	12.496	893	819	855	882
Holz	Kachelöfen	< 15	38	112	103	107	111	61.921	6.945	6.366	6.646	6.858
	Kamine	< 15	10,4	160	146	153	158	17.109	2.729	2.502	2.611	2.695
	Kaminöfen	< 15	11,2	115	105	110	113	18.497	2.118	1.942	2.027	2.092
	Heizkessel	4 - 25	12	23	17	18	22	19.294	451	320	355	416
		> 25	20	175	124	138	162	32.512	5.704	4.039	4.485	5.260
	Badeöfen	< 15	0,2	76	70	73	75	306	23	21	22	23
	Herde	< 15	1,7	77	71	74	76	2.866	220	202	211	218
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte / Summe			**100,0**	**116**	**98**	**104**	**112**	**165.000**	**19.085**	**16.211**	**17.212**	**18.443**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz und Restholz (ohne Holzwerk-stoffe)	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	72	66	68	71	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kachelöfen	< 15	5,6	112	102	107	110	2.265	253	232	242	250
	Kamine	< 15	0,3	160	146	153	158	125	20	18	19	20
	Kaminöfen	< 15	0,7	115	105	110	113	276	32	29	30	31
	Badeöfen	< 15	0,3	76	70	73	75	106	8	7	8	8
	Herde	< 15	2,1	77	71	74	76	864	66	61	64	66
	Heizkessel in	4 - 25	0,7	23	17	18	22	288	7	5	5	6
	Land-/Forstwirt.	> 25	13,8	176	124	138	162	5.578	979	694	770	903
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	29,0	21	15	17	20	11.695	250	177	197	231
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	12,5	64	50	56	62	5.042	323	250	283	312
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	9,1	64	50	56	62	3.663	234	181	206	227
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	9,2	61	47	53	59	3.707	225	174	197	218
		Summe						**33.609**	**2.397**	**1.829**	**2.021**	**2.271**
Holzwerkstoffe	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	8,2	63	44	49	58	3.299	206	146	162	190
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	3,5	104	67	73	92	1.423	148	95	104	130
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,5	104	67	73	92	1.026	107	68	75	94
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,5	104	67	73	91	1.026	107	68	75	94
		Summe						**6.775**	**568**	**378**	**416**	**508**
Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher / Summe			**100,0**	**73**	**55**	**60**	**69**	**40.384**	**2.966**	**2.206**	**2.437**	**2.780**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz und Restholz	Dauerbrandöfen	< 15	7,4	72	66	68	71	11.029	789	723	755	779
	Kachelöfen	< 15	26,3	112	102	107	110	39.388	4.398	4.032	4.209	4.343
	Kamine	< 15	10,3	160	146	153	158	15.415	2.459	2.254	2.353	2.428
	Kaminöfen	< 15	10,5	115	105	110	113	15.715	1.800	1.650	1.722	1.777
	Badeöfen	< 15	0,2	76	70	73	75	245	19	17	18	18
	Herde	< 15	2,0	77	71	74	76	3.009	231	212	221	229
	Heizkessel	4 - 25	8,4	23	17	18	22	12.612	295	209	232	272
		> 25	19,5	174	123	137	160	29.178	5.070	3.590	3.986	4.675
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	7,5	28	20	22	26	11.246	315	223	247	290
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	3,2	72	53	59	68	4.853	350	256	288	329
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,3	72	53	59	68	3.514	253	186	208	238
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,4	71	52	58	67	3.548	251	184	206	236
Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr. / Summe			**100,0**	**108**	**90**	**96**	**104**	**149.752**	**16.230**	**13.535**	**14.445**	**15.614**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes Holz und Restholz	Dauerbrandöfen	< 15	2,6	72	66	68	71	1.467	105	96	100	104
	Kachelöfen	< 15	44,6	113	103	108	111	24.798	2.800	2.567	2.679	2.765
	Kamine	< 15	3,3	160	146	153	158	1.820	290	266	278	287
	Kaminöfen	< 15	5,5	115	105	110	113	3.057	350	321	335	346
	Badeöfen	< 15	0,3	76	70	73	75	167	13	12	12	13
	Herde	< 15	1,3	77	71	74	76	720	55	51	53	55
	Heizkessel	4 - 25	12,5	23	17	18	22	6.969	163	115	128	150
		> 25	16,0	181	128	142	167	8.913	1.614	1.143	1.269	1.488
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	6,7	38	27	30	35	3.748	142	100	111	131
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	2,9	75	55	62	70	1.613	121	88	99	113
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,1	75	55	62	70	1.175	88	64	72	83
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,1	68	50	56	64	1.185	81	59	66	76
Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr. / Summe			**100,0**	**105**	**88**	**94**	**101**	**55.632**	**5.821**	**4.883**	**5.204**	**5.609**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbelassenes	Dauerbrandöfen	< 15	6,1	72	66	68	71	12.496	893	819	855	882
Holz und Restholz	Kachelöfen	< 15	31,3	112	103	107	111	64.186	7.198	6.598	6.888	7.108
	Kamine	< 15	8,4	160	146	153	158	17.234	2.749	2.520	2.631	2.715
	Kaminöfen	< 15	9,1	115	105	110	113	18.772	2.150	1.971	2.057	2.123
	Badeöfen	< 15	0,2	76	70	73	75	412	31	29	30	31
	Herde	< 15	1,8	77	71	74	76	3.729	287	263	274	283
	Heizkessel	4 - 25	9,5	23	17	18	22	19.581	458	324	360	423
		> 25	18,5	175	124	138	162	38.091	6.684	4.733	5.255	6.163
	Schachtfeuerung	> 50 - 1.000	7,3	30	22	24	28	14.994	456	323	359	421
	Einblasfeuerung	> 50 - 1.000	3,1	73	53	60	68	6.466	471	345	387	443
	Unterschubfeuerung	> 50 - 1.000	2,3	73	53	60	68	4.689	341	250	281	321
	Vorofenfeuerung	> 50 - 1.000	2,3	70	51	58	66	4.733	332	243	272	312
Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr. / Summe			**100,0**	**107**	**90**	**96**	**103**	**205.384**	**22.051**	**18.417**	**19.649**	**21.223**

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Rheinische	Dauerbrandöfen	< 15	11,5	382	300	324	363	1.115	426	334	362	405
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	43,6	44	35	37	42	4.233	187	146	158	177
	Kamine	< 15	16,6	23	18	19	22	1.613	37	29	31	35
	Kaminöfen	< 15	16,8	94	73	79	89	1.629	152	120	129	145
	Heizkessel	4 - 25	1,6	88	69	75	84	154	14	11	11	13
		> 25 - 50	2,4	88	69	75	84	233	20	16	17	19
		> 50	0,8	88	69	75	84	78	7	5	6	7
	Badeöfen	< 15	0,5	30	24	26	29	51	2	1,2	1,3	1,5
	Herde	< 15	6,2	35	27	29	33	605	21	16	18	20
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**89**	**70**	**76**	**85**	**9.711**	**865**	**679**	**734**	**823**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Importierte	Dauerbrandöfen	< 15	5,9	369	264	316	352	33	12	9	10	12
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	51,2	385	276	330	367	287	110	79	95	105
(Böhmische	Kamine	< 15	1,82	326	234	280	311	10	3	2	3	3
Braunkohlenbriketts)	Kaminöfen	< 15	3,1	326	234	280	311	17	6	4	5	5
	Heizkessel	4 - 25	17,6	140	100	120	133	98	14	10	12	13
		> 25 - 50	12,7	140	100	120	133	71	10	7	9	9
		> 50	6,3	140	100	120	133	36	5	4	4	5
	Badeöfen	< 15	0,3	111	79	95	105	2	0,2	0,1	0,2	0,2
	Herde	< 15	1,2	209	150	179	199	6	1,3	1,0	1,2	1,3
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**289**	**207**	**247**	**275**	**560**	**162**	**116**	**138**	**154**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Lausitzer	Dauerbrandöfen	< 15	5,9	125	111	116	122	554	69	61	64	67
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	51,2	96	85	89	93	4.838	462	411	430	451
	Kamine	< 15	1,8	13	12	12	13	172	2	2	2	2
	Kaminöfen	< 15	3,1	13	12	12	13	289	4	3	4	4
	Heizkessel	4 - 25	17,6	40	36	37	39	1.659	67	59	62	65
		> 25 - 50	12,7	40	36	37	39	1.200	48	43	45	47
		> 50	6,3	40	36	37	39	600	24	21	22	24
	Badeöfen	< 15	0,3	29	25	27	28	31	0,9	0,8	0,8	0,9
	Herde	< 15	1,2	11	10	11	11	109	1,2	1,1	1,2	1,2
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**72**	**64**	**67**	**70**	**9.451**	**679**	**604**	**632**	**663**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Mitteldeutsche	Dauerbrandöfen	< 15	5,9	78	60	66	74	75	6	5	5	6
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	51,2	124	96	105	117	654	81	63	69	76
	Kamine	< 15	1,8	29	22	25	27	23	0,7	0,5	0,6	0,6
	Kaminöfen	< 15	3,1	29	22	25	27	39	1,1	0,9	1,0	1,1
	Heizkessel	4 - 25	17,6	136	105	115	128	224	31	24	26	29
		> 25 - 50	12,7	136	105	115	128	162	22	17	19	21
		> 50	6,3	136	105	115	128	81	11	9	9	10
	Badeöfen	< 15	0,3	25	20	22	24	4	0,1	0,1	0,1	0,1
	Herde	< 15	1,2	38	30	32	36	15	0,6	0,4	0,5	0,5
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**120**	**92**	**102**	**113**	**1.278**	**153**	**118**	**130**	**144**
IBKB, LBKB, MBKB	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**88**	**74**	**80**	**85**	**11.289**	**994**	**837**	**900**	**960**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Rheinische	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 . 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Importierte	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
(Böhmische	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts)	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 . 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Lausitzer	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 . 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Mitteldeutsche	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohlenbriketts	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 . 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	8,5	289	230	248	276	1.776	513	409	441	490
	Kachelöfen	< 15	47,7	84	70	75	81	10.012	841	699	752	810
	Kamine	< 15	8,7	24	19	20	23	1.818	43	34	37	41
	Kaminöfen	< 15	9,4	83	65	70	79	1.974	163	128	139	155
	Heizkessel	4 - 25	10,2	58	48	52	56	2.136	125	103	111	120
		> 25 - 50	7,9	61	50	54	58	1.666	101	83	90	97
		> 50	3,8	59	49	53	57	795	47	39	42	45
	Badeöfen	< 15	0,4	31	25	27	30	88	3	2	2	3
	Herde	< 15	3,5	33	26	28	31	735	24	19	21	23
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**89**	**72**	**78**	**85**	**21.000**	**1.859**	**1.516**	**1.634**	**1.783**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 . 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	11,5	382	300	324	363	1.115	426	334	362	405
	Kachelöfen	< 15	43,6	44	35	37	42	4.233	187	146	158	177
	Kamine	< 15	16,6	23	18	19	22	1.613	37	29	31	35
	Kaminöfen	< 15	16,8	94	73	79	89	1.629	152	120	129	145
	Heizkessel	4 - 25	1,6	88	69	75	84	154	14	11	11	13
		> 25 - 50	2,4	88	69	75	84	233	20	16	17	19
		> 50	0,8	88	69	75	84	78	7	5	6	7
	Badeöfen	< 15	0,5	30	24	26	29	51	2	1,2	1,3	1,5
	Herde	< 15	6,2	35	27	29	33	605	21	16	18	20
Mittlere E-Faktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**89**	**70**	**76**	**85**	**9.711**	**865**	**679**	**734**	**823**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	5,9	131	113	120	128	661	87	75	80	84
	Kachelöfen	< 15	51,2	113	96	103	110	5.779	654	553	594	633
	Kamine	< 15	1,8	30	24	27	29	206	6	5	6	6
	Kaminöfen	< 15	3,1	30	24	27	29	346	11	8	9	10
	Heizkessel	4 - 25	17,6	56	47	50	54	1.982	111	93	100	107
		> 25 - 50	12,7	56	47	50	54	1.433	80	67	72	77
		> 50	6,3	56	47	50	54	717	40	34	36	39
	Badeöfen	< 15	0,3	32	27	29	31	37	1,2	1,0	1,1	1,1
	Herde	< 15	1,2	24	19	22	23	130	3	3	3	3
Mittlere E-Faktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**88**	**74**	**80**	**85**	**11.289**	**994**	**837**	**900**	**960**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	8,5	289	230	248	276	1.776	513	409	441	490
	Kachelöfen	< 15	47,7	84	70	75	81	10.012	841	699	752	810
	Kamine	< 15	8,7	24	19	20	23	1.818	43	34	37	41
	Kaminöfen	< 15	9,4	83	65	70	79	1.974	163	128	139	155
	Heizkessel	4 - 25	10,2	58	48	52	56	2.136	125	103	111	120
		> 25 - 50	7,9	61	50	54	58	1.666	101	83	90	97
		> 50	3,8	59	49	53	57	795	47	39	42	45
	Badeöfen	< 15	0,4	31	25	27	30	88	3	2	2	3
	Herde	< 15	3,5	33	26	28	31	735	24	19	21	23
Mittlere E-Faktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**89**	**72**	**78**	**85**	**21.000**	**1.859**	**1.516**	**1.634**	**1.783**

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	62,5	18	16	17	18	1.875	35	30	31	34
	Kachelöfen	< 15	14,6	18	16	17	18	439	8	7	7	8
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	7,6	18	16	17	18	227	4	4	4	4
		> 25 - 50	11,4	18	16	17	18	343	6	5	6	6
		> 50	3,9	18	16	17	18	116	2	2	2	2
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**3.000**	**55**	**47**	**50**	**54**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kachelöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kamine	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 25 - 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	4,2	18	16	17	18	125	2	2	2	2
	Kachelöfen	< 15	0,0	18	16	17	18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	18	16	17	18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	1,3	18	16	17	18	40	0,7	0,6	0,7	0,7
		> 50 - 1.000	94,5	18	16	17	18	2.814	52	44	47	50
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**2.979**	**55**	**47**	**50**	**53**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	18	16	17	18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kachelöfen	< 15	0,0	18	16	17	18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	18	16	17	18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	0,3	18	16	17	18	8	0,1	0,1	0,1	0,1
		> 50 - 1.000	99,7	18	16	17	18	2.588	48	41	43	46
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**2.595**	**48**	**41**	**43**	**47**

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	82,9	16	16	16	16	6.430	102	102	102	102
	Kachelöfen	< 15	17,1	16	16	16	16	1.330	21	21	21	21
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	17	17	17	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	0,0	17	17	17	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 50	0,0	17	17	17	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**7.760**	**124**	**123**	**124**	**124**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	23,4	16	16	16	16	290	5	5	5	5
	Kachelöfen	< 15	37,8	16	16	16	16	469	7	7	7	7
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	18,6	17	17	17	17	231	4	4	4	4
		> 25 - 50	13,4	17	17	17	17	167	3	3	3	3
		> 50	6,7	17	17	17	17	83	1,4	1,4	1,4	1,4
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**1.240**	**20**	**20**	**20**	**20**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	4,3	16	16	16	16	92	1,5	1,5	1,5	1,5
	Kachelöfen	< 15	0,0	16	16	16	16	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	17	17	17	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	1,3	17	17	17	17	29	0,5	0,5	0,5	0,5
		> 50 - 1.000	94,4	17	17	17	17	2.039	34	34	34	34
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**17**	**17**	**17**	**17**	**2.159**	**36**	**36**	**36**	**36**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren				Emissionsaufkommen				
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	7,7	16	16	16	16	49	0,8	0,8	0,8	0,8
	Kachelöfen	< 15	0,0	16	16	16	16	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	17	17	17	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	0,3	17	17	17	17	2	0,03	0,03	0,03	0,03
		> 50 - 1.000	92,1	17	17	17	17	584	10	10	10	10
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**17**	**17**	**17**	**17**	**634**	**11**	**11**	**11**	**11**

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	59,2	236	234	236	236	1.650	390	387	390	390
	Kachelöfen	< 15	25,2	42	42	42	42	703	29	29	29	29
	Kamine	< 15	6,9	42	42	42	42	192	8	8	8	8
	Kaminöfen	< 15	7,0	42	42	42	42	194	8	8	8	8
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	1,7	139	138	139	139	49	7	7	7	7
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**159**	**157**	**159**	**159**	**2.788**	**442**	**439**	**442**	**442**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**86**	**84**	**85**	**86**					

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	25,9	236	234	236	236	55	13	13	13	13
	Kachelöfen	< 15	74,1	42	42	42	42	157	7	7	7	7
	Kamine	< 15	0,0	42	42	42	42	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kaminöfen	< 15	0,0	42	42	42	42	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	139	138	139	139	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**92**	**91**	**92**	**92**	**212**	**20**	**19**	**20**	**20**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**92**	**91**	**92**	**92**					

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kachelöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kamine	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	<15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 25 - 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher**		**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher**		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**					

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kachelöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kamine	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	<15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 25 - 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher**		**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher**		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**					

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	62,5	18	16	17	18	1.875	35	30	31	34
	Kachelöfen	< 15	14,6	18	16	17	18	439	8	7	7	8
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	7,6	18	16	17	18	227	4	4	4	4
		> 25 - 50	11,4	18	16	17	18	343	6	5	6	6
		> 50	3,9	18	16	17	18	116	2	2	2	2
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**3.000**	**55**	**47**	**50**	**54**

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	74,7	16	16	16	16	6.720	107	106	107	107
	Kachelöfen	< 15	20,0	16	16	16	16	1.799	29	28	29	29
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	2,6	17	17	17	17	231	4	4	4	4
		> 25 - 50	1,9	17	17	17	17	167	3	3	3	3
		> 50	0,9	17	17	17	17	83	1,4	1,4	1,4	1,4
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**9.000**	**144**	**143**	**144**	**144**

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	56,8	236	234	236	236	1.705	403	399	403	403
	Kachelöfen	< 15	28,7	42	42	42	42	860	36	36	36	36
	Kamine	< 15	6,4	42	42	42	42	192	8	8	8	8
	Kaminöfen	< 15	6,5	42	42	42	42	194	8	8	8	8
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 50	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	< 15	1,6	139	138	139	139	49	7	7	7	7
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**154**	**153**	**154**	**154**	**3.000**	**462**	**458**	**462**	**462**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte**		**100,0**	**86**	**84**	**85**	**86**					

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	2,2	18	16	17	18	125	2	2	2	2
	Kachelöfen	< 15	0,0	18	15	16	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	18	15	16	17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	0,8	18	16	17	18	47	0,9	0,7	0,8	0,8
		> 50 - 1.000	96,9	18	16	17	18	5.402	100	85	90	97
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**5.574**	**103**	**88**	**93**	**100**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	5,0	16	16	16	16	141	2	2	2	2
	Kachelöfen	< 15	0,0	14	14	14	14	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	11	11	11	11	0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	1,1	17	17	17	17	30	0,5	0,5	0,5	0,5
		> 50 - 1.000	93,9	17	17	17	17	2.623	44	44	44	44
	Mittlere Emissionsfaktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**17**	**17**	**17**	**17**	**2.794**	**47**	**46**	**47**	**47**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kachelöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Herde	<15	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohlenbriketts	**Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher**		**0,0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher**		**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**					

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	33,5	18	16	17	18	2.000	37	32	33	36
	Kachelöfen	< 15	7,3	18	16	17	18	439	8	7	7	8
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	3,8	18	16	17	18	227	4	4	4	4
		> 25 - 50	6,4	18	16	17	18	383	7	6	6	7
		> 50 - 1.000	49,0	18	16	17	18	2.930	54	46	49	53
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**5.979**	**110**	**94**	**100**	**107**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	65,8	16	16	16	16	6.522	104	103	104	104
	Kachelöfen	< 15	13,4	16	16	16	16	1.330	21	21	21	21
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0					0				
		> 25 - 50	0,3	17	17	17	17	29	0,5	0,5	0,5	0,5
		> 50 - 1.000	20,6	17	17	17	17	2.039	34	34	34	34
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**9.919**	**160**	**158**	**160**	**160**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	59,2	236	234	236	236	1.650	390	387	390	390
	Kachelöfen	< 15	25,2	42	42	42	42	703	29	29	29	29
	Kamine	< 15	6,9	42	42	42	42	192	8	8	8	8
	Kaminöfen	< 15	7,0	42	42	42	42	194	8	8	8	8
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	1,7	139	138	139	139	49	7	7	7	7
Steinkohlenbriketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**159**	**157**	**159**	**159**	**2.788**	**442**	**439**	**442**	**442**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**63**	**61**	**62**	**63**					

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	0,0					0				
	Kachelöfen	< 15	0,0					0				
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	0,0					0	0,0	0,0	0,0	0,0
		> 25 - 50	0,3	18	16	17	18	8	0,1	0,1	0,1	0,1
		> 50 - 1.000	99,7	18	16	17	18	2.588	48	41	43	46
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**2.595**	**48**	**41**	**43**	**47**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	18,1	16	16	16	16	339	5	5	5	5
	Kachelöfen	< 15	25,0	16	16	16	16	469	7	7	7	7
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	12,3	17	17	17	17	231	4	4	4	4
		> 25 - 50	9,0	17	17	17	17	168	3	3	3	3
		> 50 - 1.000	35,6	17	17	17	17	667	11	11	11	11
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**1.874**	**31**	**31**	**31**	**31**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	25,9	236	234	236	236	55	13	13	13	13
	Kachelöfen	< 15	74,1	42	42	42	42	157	7	7	7	7
	Kamine	< 15	0,0					0				
	Kaminöfen	< 15	0,0					0				
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0					0	-	-	-	-
Steinkohlenbriketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**92**	**91**	**92**	**92**	**212**	**20**	**19**	**20**	**20**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**24**	**22**	**22**	**24**					

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	23,3	18	16	17	18	2.000	37	32	33	36
	Kachelöfen	< 15	5,1	18	16	17	18	439	8	7	7	8
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	2,6	18	16	17	18	227	4	4	4	4
		> 25 - 50	4,6	18	16	17	18	390	7	6	6	7
		> 50 - 1.000	64,4	18	16	17	18	5.518	102	87	92	99
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**18**	**16**	**17**	**18**	**8.574**	**158**	**135**	**143**	**154**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenkoks	Dauerbrandöfen	< 15	58,2	16	16	16	16	6.861	109	108	109	109
	Kachelöfen	< 15	15,3	16	16	16	16	1.799	29	28	29	29
	Kamine	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Kaminöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Heizkessel	4 - 25	2,0	17	17	17	17	231	4	4	4	4
		> 25 - 50	1,7	17	17	17	17	197	3	3	3	3
		> 50 - 1.000	22,9	17	17	17	17	2.706	45	45	45	45
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte und Kleinverbraucher			**100,0**	**16**	**16**	**16**	**16**	**11.794**	**191**	**189**	**191**	**191**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Dauerbrandöfen	< 15	56,8	236	234	236	236	1.705	403	399	403	403
	Kachelöfen	< 15	28,7	42	42	42	42	860	36	36	36	36
	Kamine	< 15	6,4	42	42	42	42	192	8	8	8	8
	Kaminöfen	< 15	6,5	42	42	42	42	194	8	8	8	8
	Heizkessel	4 - 25	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 25 - 50	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
		> 50 - 1.000	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Badeöfen	< 15	0,0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Herde	< 15	1,6	139	138	139	139	49	7	7	7	7
Steinkohlenbriketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**154**	**153**	**154**	**154**	**3.000**	**462**	**458**	**462**	**462**
Steinkohlen + SK-Briketts	**Mittlere E-Faktoren Haush. u. Kleinverbr.**		**100,0**	**54**	**51**	**52**	**53**					

Geltungsbereich:	Haushalte	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	2,9	5,0	4,3	5,0	5,0	19.396	97	82	97	97
	Ölbrenner mit	4 - 25	22,0	1,8	1,6	1,8	1,8	147.658	271	230	271	271
	Gebläse	> 25 - 50	52,2	1,4	1,2	1,4	1,4	350.088	477	405	477	477
	(Heizkessel)	> 50	22,8	1,7	1,5	1,7	1,7	153.141	265	225	265	265
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**670.283**	**1.110**	**943**	**1.110**	**1.110**

Geltungsbereich:	Haushalte	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	1,2	5,0	4,3	5,0	5,0	923	5	4	5	5
	Ölbrenner mit	4 - 25	49,1	1,6	1,4	1,6	1,6	37.706	60	51	60	60
	Gebläse	> 25 - 50	31,7	1,6	1,3	1,6	1,6	24.353	38	32	38	38
	(Heizkessel)	> 50	17,9	1,6	1,4	1,6	1,6	13.735	22	19	22	22
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**1,6**	**1,4**	**1,6**	**1,6**	**76.717**	**125**	**106**	**125**	**125**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	0,2	5,0	4,3	5,0	5,0	412	2	2	2	2
	Ölbrenner mit	4 - 25	4,8	1,8	1,6	1,8	1,8	10.440	19	16	19	19
	Gebläse	> 25 - 50	11,4	1,4	1,2	1,4	1,4	24.840	34	29	34	34
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	83,6	1,7	1,5	1,7	1,7	182.291	316	268	316	316
	Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**217.983**	**371**	**315**	**371**	**371**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren						Emissionsaufkommen		
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	0,0	5,0	4,3	5,0	5,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Heizkessel mit	4 - 25	3,5	1,6	1,4	1,6	1,6	1.418	2	1,9	2	2
	Ölbrenner mit	> 25 - 50	9,1	1,6	1,3	1,6	1,6	3.700	6	5	6	6
	Gebläse	> 50 - 5.000	87,3	1,6	1,4	1,6	1,6	35.326	58	49	58	58
	Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**1,6**	**1,4**	**1,6**	**1,6**	**40.444**	**66**	**56**	**66**	**66**

Geltungsbereich:	Haushalte	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	2,7	5,0	4,3	5,0	5,0	20.319	102	86	102	102
	Ölbrenner mit	4 - 25	24,8	1,8	1,5	1,8	1,8	185.364	331	281	331	331
	Gebläse	> 25 - 50	50,1	1,4	1,2	1,4	1,4	374.441	515	437	515	515
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	22,3	1,7	1,5	1,7	1,7	166.876	288	244	288	288
	Mittlere Emissionsfaktoren Haushalte		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**747.000**	**1.235**	**1.050**	**1.235**	**1.235**

Geltungsbereich:	Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	0,2	5,0	4,3	5,0	5,0	412	2	2	2	2
	Ölbrenner mit	4 - 25	4,6	1,8	1,5	1,8	1,8	11.858	21	18	21	21
	Gebläse	> 25 - 50	11,0	1,4	1,2	1,4	1,4	28.539	40	34	40	40
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	84,2	1,7	1,5	1,7	1,7	217.617	373	317	373	373
	Mittlere Em.faktoren Kleinverbraucher		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**258.427**	**436**	**371**	**436**	**436**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Alte Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	2,2	5,0	4,3	5,0	5,0	19.808	99	84	99	99
	Ölbrenner mit	4 - 25	17,8	1,8	1,6	1,8	1,8	158.098	290	246	290	290
	Gebläse	> 25 - 50	42,2	1,4	1,2	1,4	1,4	374.928	511	434	511	511
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	37,8	1,7	1,5	1,7	1,7	335.432	581	494	581	581
	Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr.		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**888.266**	**1.481**	**1.258**	**1.481**	**1.481**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Neue Bundesländer		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	0,8	5,0	4,3	5,0	5,0	923	5	4	5	5
	Ölbrenner mit	4 - 25	33,4	1,6	1,4	1,6	1,6	39.124	62	53	62	62
	Gebläse	> 25 - 50	23,9	1,6	1,3	1,6	1,6	28.053	44	37	44	44
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	41,9	1,6	1,4	1,6	1,6	49.061	80	68	80	80
	Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr.		**100,0**	**1,6**	**1,4**	**1,6**	**1,6**	**117.161**	**190**	**162**	**190**	**190**

Geltungsbereich:	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland		Emissionsfaktoren					Emissionsaufkommen			
Brennstoff	Feuerung	Leistungs-bereich	Anteiliger Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in kg/TJ			Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	%	kg/TJ	PM1	PM2,5	PM10	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Ölbrenner ohne Gebläse	> 4	2,1	5,0	4,3	5,0	5,0	20.731	104	88	104	104
	Ölbrenner mit	4 - 25	19,6	1,8	1,5	1,8	1,8	197.222	352	299	352	352
	Gebläse	> 25 - 50	40,1	1,4	1,2	1,4	1,4	402.981	554	471	554	554
	(Heizkessel)	> 50 - 5.000	38,2	1,7	1,5	1,7	1,7	384.493	661	562	661	661
	Mittlere E-Faktoren Haush. und Kleinverbr.		**100,0**	**1,7**	**1,4**	**1,7**	**1,7**	**1.005.427**	**1.671**	**1.420**	**1.671**	**1.671**

Anhang C – Sektorales Emissionsaufkommen

Inhaltsübersicht zu Anhang C

Seiten

Zusammenstellung der berechneten sektoralen Emissionsaufkommens ..... **95 - 100**

Holzbrennstoffe 96

Braunkohlenbrennstoffe 97

Steinkohlenbrennstoffe ..... 98 - 99

Heizöl EL 100

Ergebnisübersicht zum Emissionsaufkommen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher im Jahr 2000

Brennstoff	Bereich	Leistungs-bereich	Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
naturbel. Holz	Haushalte alte Bundesländer	> 4	118.800	13.977	11.846	12.584	13.499
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	46.200	5.108	4.365	4.628	4.944
	Summe Haushalte	**> 4**	**165.000**	**19.085**	**16.211**	**17.212**	**18.443**
naturbelassenes Holz und Rest-hölzer (ohne Holzwerkstoffe)	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	25.865	1.846	1.419	1.564	1.752
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	7.744	551	410	456	519
	Summe Kleinverbraucher (ohne Holzwerkstoffe)	**> 4 - 1.000**	**33.609**	**2.397**	**1.829**	**2.021**	**2.271**
Holzwerkstoffe	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 50	5.087	407	269	297	363
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 50	1.687	162	108	120	145
	Summe Kleinverbraucher (Holzwerkstoffe)	**> 50**	**6.775**	**568**	**378**	**416**	**508**
naturbelassenes Holz und Resthölzer	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	30.952	2.253	1.688	1.861	2.115
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	9.432	713	518	576	665
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**40.384**	**2.966**	**2.206**	**2.437**	**2.780**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**149.752**	**16.230**	**13.535**	**14.445**	**15.614**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**55.632**	**5.821**	**4.883**	**5.204**	**5.609**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**205.384**	**22.051**	**18.417**	**19.649**	**21.223**

Ergebnisübersicht zum Emissionsaufkommen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher im Jahr 2000							
Brennstoff	Bereich	Leistungs-bereich	Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Braunkohlenbriketts	Haushalte alte Bundesländer	> 4	9.711	865	679	734	823
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	11.289	994	837	900	960
	Summe Haushalte	> 4	**21.000**	**1.859**	**1.516**	**1.634**	**1.783**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	0	0	0	0	0
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	0	0	0	0	0
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**9.711**	**865**	**679**	**734**	**823**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**11.289**	**994**	**837**	**900**	**960**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**21.000**	**1.859**	**1.516**	**1.634**	**1.783**

Ergebnisübersicht zum Emissionsaufkommen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher im Jahr 2000							
Brennstoff	Bereich	Leistungs-bereich	Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlen	Haushalte alte Bundesländer	> 4	3.000	55	47	50	54
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	0	0	0	0	0
	Summe Haushalte	**> 4**	**3.000**	**55**	**47**	**50**	**54**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	2.979	55	47	50	53
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	2.595	48	41	43	47
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**5.574**	**103**	**88**	**93**	**100**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**5.979**	**110**	**94**	**100**	**107**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**2.595**	**48**	**41**	**43**	**47**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**8.574**	**158**	**135**	**143**	**154**
Steinkohlenkoks	Haushalte alte Bundesländer	> 4	7.760	124	123	124	124
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	1.240	20	20	20	20
	Summe Haushalte	**> 4**	**9.000**	**144**	**143**	**144**	**144**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	2.159	36	36	36	36
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	634	11	11	11	11
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**2.794**	**47**	**46**	**47**	**47**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**9.919**	**160**	**158**	**160**	**160**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**1.874**	**31**	**31**	**31**	**31**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**11.794**	**191**	**189**	**191**	**191**

Brennstoff	Bereich	Leistungs-bereich	Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Steinkohlenbriketts	Haushalte alte Bundesländer	> 4	2.788	442	439	442	442
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	212	20	19	20	20
	Summe Haushalte	**> 4**	**3.000**	**462**	**458**	**462**	**462**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	0	-	-	-	-
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	0	-	-	-	-
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**0**	-	-	-	-
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**2.788**	**442**	**439**	**442**	**442**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**212**	**20**	**19**	**20**	**20**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**3.000**	**462**	**458**	**462**	**462**
Steinkohlen +	Haushalte alte Bundesländer	> 4	5.788	498	486	492	496
Steinkohlenbriketts	Haushalte neue Bundesländer	> 4	212	20	19	20	20
	Summe Haushalte	**> 4**	**6.000**	**517**	**505**	**512**	**515**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 1.000	2.979	55	47	50	53
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 1.000	2.595	48	41	43	47
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 1.000**	**5.574**	**103**	**88**	**93**	**100**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**8.767**	**553**	**533**	**542**	**549**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**2.807**	**68**	**60**	**63**	**66**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**11.574**	**620**	**593**	**604**	**615**

Ergebnisübersicht zum Emissionsaufkommen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher im Jahr 2000							
Brennstoff	Bereich	Leistungs-bereich	Endenergie-verbrauch	Partikel	Partikelfraktionen PMx in t		
		kW	TJ	t	PM1	PM2,5	PM10
Heizöl EL	Haushalte alte Bundesländer	> 4	670.283	1.110	943	1.110	1.110
	Haushalte neue Bundesländer	> 4	76.717	125	106	125	125
	Summe Haushalte	> 4	**747.000**	**1.235**	**1.050**	**1.235**	**1.235**
	Kleinverbraucher alte Bundesländer	> 4 - 5.000	217.983	371	315	371	371
	Kleinverbraucher neue Bundesländer	> 4 - 5.000	40.444	66	56	66	66
	Summe Kleinverbraucher	**> 4 - 5.000**	**258.427**	**436**	**371**	**436**	**436**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, alte Bundesländer	**> 4**	**888.266**	**1.481**	**1.258**	**1.481**	**1.481**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, neue Bundesländer	**> 4**	**117.161**	**190**	**162**	**190**	**190**
	Summe Haushalte und Kleinverbraucher, Deutschland	**> 4**	**1.005.427**	**1.671**	**1.420**	**1.671**	**1.671**

Anhang D - Bewertung der ermittelten Emissionsfaktoren

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Ermittlung von Emissionsfaktoren und, darauf aufbauend, in der Berechnung des aktuellen Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland. Die Partikelemissionen sollten differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und der Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} dargestellt werden. In allen Teilschritten des Berechnungsverfahrens - Ermittlung des Anlagenbestandes und des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs sowie Beschreibung des Emissionsverhaltens der Feuerungsanlagen – wurden nur abgesicherte und nachvollziehbare Daten herangezogen. War eine entsprechende Datengrundlage nicht vorhanden, wurde auf bestmögliche Schätzungen zurückgegriffen.

Deshalb wurden alle verwendeten Eingangsdaten aus der Literatur und aus eigenen Erhebungen auf ihre Qualität hin überprüft. Grundsätzlich wurden zur Beschreibung des Emissionsverhaltens der Feuerungsanlagen nur solche Emissionswerte in die weitere Berechnung übernommen, bei denen vollständige und zweifelsfreie Angaben zum eingesetzten Brennstoff, zur Bauart der Feuerung und deren Betriebsweise während der Messungen vorhanden waren.

Alle ermittelten gerätebezogenen Emissionsfaktoren wurden hinsichtlich ihrer Datenbasis einer internen Qualitätsbeurteilung unterzogen. So wurde jeder ermittelte Emissionsfaktor in eine von vier Qualitätsstufen (A bis D) eingeordnet, wobei A die höchste und D die niedrigste Stufe darstellt. Voraussetzung für die Einordnung eines Emissionsfaktors in die höchste Qualitätsstufe war hierbei eine ausreichend breite Datenbasis mit einer hohen Qualität und Verlässlichkeit der Emissionsmessungen, die z.B. durch Einsatz von erprobten, abgesicherten sowie anerkannten Messverfahren und Vorgehensweisen beim Betrieb der Feuerungen erhalten wird.

Basiert die Berechnung der Emissionsfaktoren auf nur wenigen Messwerten (u.U. liegt nur ein einziger Wert vor) oder erfolgten die Messungen z.B. mit nicht ausreichend erprobten Messverfahren, so wurde diesen Faktoren die niedrigste Qualitätsstufe zugeordnet. Die Emissionsfaktoren in der niedrigsten Qualitätsstufe geben somit nur die zu erwartende Größenordnung eines tatsächlichen Emissionsfaktors wieder.

Tabelle D1 gibt in zusammengefasster Form einen Überblick über die Bewertung der ermittelten (sektoralen) Emissionsfaktoren. In dieser Übersicht sind die häufigsten Nennungen der Qualitätsstufen aufgeführt.

Tabelle D1: Zusammenfassende Bewertung der ermittelten Emissionsfaktoren für Partikel der Haushalte und Kleinverbraucher anhand von vier Qualitätsstufen

Bewertung der Emissionsfaktoren für Partikel	Bandbreite der häufigsten Nennungen der Qualitätsstufen bei			
	Heizöl EL	Steinkohlenbrennstoffen	Braunkohlenbrennstoffen	Holzbrennstoffen
Heizkessel	A-B	C-D	C-D	A-B
Ölöfen	D			
Dauerbrandöfen		A-C	A-B	C
Kachelöfen		C-D	A-C	A
Kamine		D	C-D	B
Kaminöfen		D	C	B
Badeöfen			C	C
Herde		D	C	C
Heizkessel-Schachtfeuerungen *				C
Einblasfeuerungen *				D
Unterschubfeuerungen *				A-B
Vorofenfeuerungen *				A-B

* gewerbliche Holzfeuerungen
leeres Feld keine sektoralen Emissionsfaktoren vorhanden

Qualitätsstufen:
- A breite Datenbasis mit zuverlässigem Hintergrund
- B mittlere Datenbasis, Hintergrund kann noch als zuverlässig bezeichnet werden
- C geringe Datenbasis, nur stichprobenartige Emissionsmessungen
- D Einzelmessungen; Abschätzungen der Emissionsfaktoren auf Basis vergleichbarer Feuerungen (nur Abgaskomponenten mit geringer Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen)

Die Angabe eines Fehler- oder Unsicherheitsbereiches für die ermittelten (sektoralen) Emissionsfaktoren und das berechnete Emissionsaufkommen ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

- die Unsicherheiten die den Eingangsdaten (gerätebezogener Endenergieverbrauch, Zahlen zum Anlagenbestand, Emissionswerte) zugrunde liegen sind nicht bekannt

- es existiert kein anerkanntes Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Unsicherheiten für Emissionsfaktoren. In einem derartigen Berechnungsverfahren müsste u.a. auch festgelegt werden, wie sich die Größe einer Stichprobe (z.B. die Anzahl der Messwerte) und deren Standardabweichung auf die Genauigkeit der Wiedergabe der Grundgesamtheit (z.B. des Emissionsverhaltens aller installierter Kaminöfen die mit naturbelassenem Holz betrieben werden) auswirkt.

Zur Festlegung eines Bewertungsverfahrens für Emissionsfaktoren von Feuerungsanlagen, welches nach einheitlichen, nachvollziehbaren, objektiven und dokumentierten Kriterien eine Beurteilung der Aussagekraft der Emissionsfaktoren erlaubt, ist noch zusätzlicher Forschungsbedarf notwendig.

Berichtsteil: Messberichte

Aufgabenstellung und Messprogramm

Im Rahmen des Vorhabens sollen Emissionsfaktoren und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland ermittelt werden. Die Partikelemissionen werden differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und der Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}. Hierzu sollen Partikelmessungen auf dem Prüfstand und an installierten Anlagen durchgeführt werden. Ergänzend sollen auch bisher durchgeführte eigene Untersuchungen verwendet und vorhandene Literaturangaben ausgewertet werden.

Die Messungen werden an typischen Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher für die Brennstoffe Heizöl EL, Steinkohlen (Anthrazit und Steinkohlenbriketts), Braunkohlenbriketts (Rheinisches, Lausitzer, Mitteldeutsches und Böhmisches Revier) und Holzbrennstoffe (naturbelassenes stückiges Holz, Holzpreßlinge und Restholz) durchgeführt. Durch die Variation der Brennstoffe und der Feuerungswärmeleistungen bei den Abbrandversuchen sowie durch den Einsatz von Abgasreinigungseinrichtungen werden anlagen-, brennstoff- und lastabhängigen Einflussgrößen auf die Partikelemission deutlich und es können geeignete Maßnahmen zur Emissionsminderung aufgezeigt werden.

Tabelle 1 enthält eine Übersicht der untersuchten Feuerungen und Brennstoffe sowie der bei den Versuchen eingestellten Wärmeleistungen. Die Ergebnisse der Partikelmessungen liegen bei den Prüfstandsuntersuchungen in der Regel als Mittelwerte von zweien bei unveränderten Randbedingungen nacheinander durchgeführten Messungen vor. Bei den Praxismessungen war dies nicht immer möglich, da die Randbedingungen (z.B. Wärmeleistung) im allgemeinen nicht ausreichend lange unverändert blieben. Die Untersuchungen wurden von den am Vorhaben beteiligten Institutionen jeweils eigenverantwortlich durchgeführt und sind in den Berichtsteilen I (Einzelfeuerstätten), II (Heizölkessel), III (Holzkessel privater Haushalte) und IV (Anlagen der Kleinverbraucher) ausführlich beschrieben.

Um auch die Anteile kondensierbarer organischer Verbindungen zu erfassen und um unabhängig von der Bauart der Feuerstätte und deren Betriebsbedingungen vergleichbare Verhältnisse zu erreichen, erfolgt bei den Einzelfeuerstätten und beim Stückholzkessel (Altanlage) die Probenahme zur Bestimmung der Partikelemissionen im **verdünnten** Abgas. Bei den übrigen Feuerungen erfolgt die Partikelprobenahme im **unverdünnten** Abgas.

Tabelle 1: Zusammenstellung der in diesem Vorhaben untersuchten Feuerungen, Brennstoffe und Wärmeleistungen

Bereich	Bauart der Feuerung	verwendete Brennstoff	Wärmeleistung	Messberichte
Einzelfeuerstätten	Dauerbrandofen (ältere Verbrennungstechnik)	Steinkohlenbrennstoffe (Anthrazit und Steinkohlenbriketts)	NWL	**Teil I**
	Heizeinsatz für Kachelöfen (weitverbreitete Verbrennungstechnik)	Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen, Mitteldeutschen und Böhmischen Revier	NWL, MWL	
		Holzscheite (lufttrockenes Buchenholz)	MWL	
	Kamineinsatz (moderne Verbrennungstechnik)	Holzscheite (lufttrockenes Buchenholz)	NWL, MWL	
	Kaminofen (moderne Verbrennungstechnik)	Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier	NWL, MWL	
Heizkessel private Haushalte	Heizkessel mit Ölgebläsebrenner (marktübliches Gerät und Altanlage)	Heizöl EL mit unterschiedlichen Schwefelgehalten ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv	stationärer Dauerbetrieb bei NWL	**Teil II**
	Stückholzkessel mit Gebläse (Neuanlage)	Holzscheite (lufttrockenes Nadel- und Buchenholz)	NWL und KWL	**Teil III**
	Stückholzkessel ohne Gebläse (Altanlage)	Holzscheite (lufttrockenes Nadelholz)	oberer und unterer Lastbereich	
	Hackgutfeuerung (Neuanlage)	Hackgut mit zwei unterschiedlichen Feuchtegehalten	NWL, MWL und KWL	
	Kessel-Pelletfeuerung (Neuanlage)	Holzpellets	NWL, MWL und KWL	
Anlagen der Kleinverbraucher	Vorschubrostfeuerung 450 kW (Praxismessungen an Neuanlage)	Hackschnitzel	nach Wärmebedarf	**Teil IV**
	Unterschubfeuerung 250 oder 650 kW (Praxismessungen an älterer Anlage)	Restholz	nach Wärmebedarf	
	Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage)	Restholz	NWL, MWL und KWL	

NWL Nennwärmeleistung MWL mittlere Wärmeleistung KWL kleinstmögliche Wärmeleistung

Bei den Messungen wurden folgende Größen erfasst:

Partikel:
- gravimetrische Bestimmung der Gesamtpartikelkonzentration nach der Planfiltermethode (VDI 2066, Blatt 1 und 7)
- Bestimmung der Partikelgrößenverteilung zur Ermittlung der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} mit 8stufigem Kaskadenimpaktor vom Typ Mark III der Firma Andersen (VDI 2066, Blatt 5) und 13stufigem Niederdruck-Kaskadenimpaktor vom Typ LPI 20 der Firma Dekati

Gaskonzentrationen:
- im unverdünnten Abgas: CO_2 (O_2), SO_2 (bei Kohlenbrennstoffen), CO, VOC
- im verdünnten Abgas: CO_2

Sonstige Größen:
- Brennstoffverbrauch
- Abgasparameter

Durch die Einbeziehung von eigenen Messungen aus anderen Vorhaben können für relativ viele Bauarten von Feuerungen brennstoff- und lastabhängige Einflussgrößen auf die Partikelbildung untersucht werden. Außerdem stehen somit auch mehr Daten zur Verfügung, um anlagenspezifische Einflussgrößen zu untersuchen, Anlagenarten und Anlagentechniken zu bewerten und Emissionsfaktoren für Partikel zu ermitteln. In **Tabelle 2** sind die in anderen Vorhaben untersuchten Feuerungen und Brennstoffe aufgelistet.

Tabelle 2: Zusätzliche eigene Messungen aus anderen Vorhaben mit unterschiedlichen Feuerungen, Brennstoffen und Wärmeleistungen

Bereich	Bauart der Feuerung	verwendete Brennstoff	Wärme-leistung	Mess-berichte
Einzelfeuerstätten	Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) (ältere Verbrennungstechnik, Ostdeutschland)	Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier	NWL, MWL	**Teil I**
	Heizeinsatz für Kachelofen (weitverbreitete Verbrennungstechnik)	Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier	NWL, MWL	
		Holzscheite (lufttrockenes Buchen- und Fichtenholz)	NWL, MWL	
	Kaminofen (moderne Verbrennungstechnik)	Holzscheite (lufttrockenes Buchenholz)	NWL, MWL	
	Pelletofen (Kaminofen) (moderne Verbrennungstechnik)	Holzpellets	NWL	
Anlagen der Kleinverbraucher	Unterschubfeuerung 175 kW (Versuchsanlage)	naturbelassene Hackschnitzel und Resthölzer (beschichtete Spanplatten)	NWL	**Teil IV**
	Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage)	naturbelassene Hackschnitzel und Resthölzer	NWL und MWL	
	Vorschubrostfeuerung 450 kW (Praxismessungen an Neuanlage)	naturbelassene Hackschnitzel	NWL und MWL	

NWL Nennwärmeleistung MWL mittlere Wärmeleistung

Qualitätssicherung

Als Maßnahme zur Qualitätssicherung wurden auch Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Partikelkonzentration und der Größenverteilung der Partikel zwischen den an diesem Vorhaben beteiligten und anderen Forschungsstellen durchgeführt. Hierbei wurde u.a. der Einfluss der Handhabung der Probenahmegeräte und Filtersubstrate sowie des eingesetzten Auswerteverfahrens zur Ermittlung der Größenverteilung der Partikel untersucht.

Bei kleinen Messquerschnitten ist die Verwendung von gekrümmten Sonden bei der Probenahme notwendig. Dies war in diesem Vorhaben meist der Fall, da vor allem die Partikelemissionen von Feuerungsanlagen geringer Leistung untersucht wurden. Die Querschnitte der Abgasrohre dieser Feuerungen sind so klein, dass der Impaktor bei der Probenahme nicht direkt im Abgasrohr angebracht werden kann. Obwohl die Krümmungsradien der gekrümmten Sonden strömungstechnisch günstig ausgebildet werden, sind die Partikelverluste

hier im allgemeinen höher als bei der Verwendung gerader Sonden. Aus diesem Grund wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Probenahmesonden (gerade und gekrümmte Sonde) auf die gemessene Partikelkonzentration und Größenverteilung der Partikel betrachtet.

Außerdem wurde bei den Vergleichsmessungen noch untersucht, wie sich die absolute Höhe der Partikelkonzentration auf die Abweichung zwischen gemessener und Soll-Konzentration sowie auf die Größenverteilung auswirkt und wie die Verluste bei der Probenahme zu bewerten sind. Die Messungen wurden im April 2000 an der Emissions-Simulations-Anlage (ESA) der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (HLUG) in Kassel durchgeführt.

Der üblicherweise bei Gesamtstaubmessungen in der ESA verwendete Teststaub besitzt einen hohen Anteil an Partikeln > 10 µm und konnte aufgrund dieser ungünstigen Größenverteilung für die Vergleichsmessungen nicht eingesetzt werden. Deshalb wurde ein Staub aus der dritten Elektrofilterstufe des Braunkohlekraftwerks Neurath (Block D) verwendet. Mittels eines optischen Verfahrens wurde für den eingesetzten Staub die Anzahlverteilung in Abhängigkeit der Partikelgröße ermittelt. Der dabei ermittelte mittlere Durchmesser für die Partikelanzahlverteilung liegt bei etwa 3,1 µm. Die Anzahlverteilung weist die Form einer symmetrischen Gausverteilung auf. Die mittlere Dichte des verwendeten Staubes wurde mittels eines Pyknometers mit 3,1 g/cm³ bestimmt.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen zeigten, dass mit den Planfilterkopfgeräten von den einzelnen Teilnehmern gut vergleichbare Gesamt-Partikelkonzentrationen gemessen wurden. Zwischen den jeweiligen Sollkonzentrationswerten der ESA und den Teilnehmern traten nur geringe Abweichungen in der Größenordnung von 2 bis 3 % auf. Bei diesen Messungen konnte kein Zusammenhang zwischen der Abweichung von gemessener Konzentration zu Sollwert und dem Absolutwert der Partikelkonzentration festgestellt werden.

Bei den einzelnen Probenahmen mit dem Kaskadenimpaktor der Firma Andersen vom Typ Mark III wurden gut erkennbare Partikelablagerungen im Übergangsteil des Impaktors festgestellt. Das Verhältnis der mit den Impaktorergebnissen berechneten Gesamt-Partikelkonzentration zum ESA-Sollwert liegt bei Verwendung einer geraden Entnahmesonde im Mittel bei rund 70 % und bei den Messungen mit gekrümmter Entnahmesonde bei rund 61 %. Die Ergebnisse für die einzelnen Teilnehmer waren bei einer Abweichung von im Mittel maximal 9 % gut vergleichbar. Eine Abhängigkeit der Partikelverluste vom ESA-Sollwert wurde nicht festgestellt.

Durch die Verwendung einer gekrümmten Sonde ist bei dem für die Vergleichsmessungen verwendeten Staub mit zusätzlichen Verlusten zu rechnen. Die Staubeigenschaften haben allerdings einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Probenahmeverluste. Somit können diese nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse bei den untersuchten Feuerungsanlagen übertragen werden.

Trotz den unterschiedlichen Probenahmeverluste weisen die ermittelten Partikelfraktionen PM_x eine gute Übereinstimmung bei den eingesetzten Impaktoren, den unterschiedlichen Entnahmesonden und den verschiedenen Teilnehmern auf. Hieraus folgt, dass sich die Probenahmeverluste keiner bestimmten Partikelgröße zuordnen lassen.

In **Bild 1** sind die Anteile der ermittelten Partikelfraktionen für die Impaktor der Firma Andersen bei Verwendung von geraden und gekrümmten Entnahmesonden dargestellt.

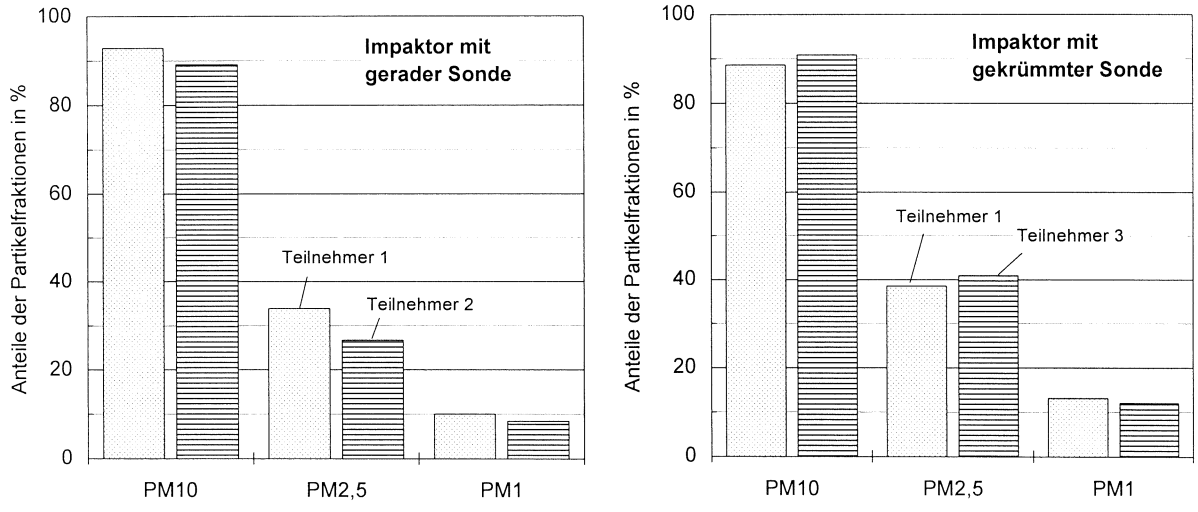


Bild 1: Bei den Vergleichsmessungen ermittelte Partikelfraktionen PM_x für die Impaktoren der Firma Andersen vom Typ Mark III mit gerader oder gekrümmter Entnahmesonde

Aus den Ergebnissen der Vergleichsmessung lässt sich folgern, dass eine weitergehende Harmonisierung und Standardisierung korngrößenselektiver Messungen und Auswertungen notwendig ist, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Messinstitutionen zu gewährleisten. So sollte z.B. die Konditionierung der Filtersubstrate (Vor- und Nachbehandlung), die Ermittlung der Trenngrenzen der Impaktorstufen und die Berechnung der Anteile für die verschiedenen Partikelfraktionen soweit vergleichbar sein, dass aus diesen Gründen nur unwesentliche Abweichungen im Endergebnis auftreten.

Der Ablauf, die Auswertung sowie die detaillierten Ergebnisse der Vergleichsmessungen zur korngrößenselektiven Partikelbestimmung mit insgesamt vier Teilnehmern ist in einem ausführlicher Bericht zusammengefasst (Dreiseidler et al., 2001).

Durch diese Vergleichsmessungen wurde eine Anpassung der Probenahmeverfahren, der Substrat-Konditionierung und der Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung der Partikelfraktionen PM_x zwischen den am Vorhaben beteiligten Messinstitutionen ermöglicht. Durch die definierten Randbedingungen bei den Partikelmessungen sind auch die von den Beteiligten ermittelten Ergebnisse sehr gut vergleichbar.

Literatur

Dreiseidler, A., Struschka, M., Straub, D. und Baumbach, G. 2001.
Vergleichsmessungen mit Kaskadenimpaktoren. Erschienen in der Reihe IVD-Bericht als Nr. 45. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart.

VDI-Richtlinie 2066.
Messen von Partikeln. Blätter 1 bis 7, jeweils aktuellste Fassung. VDI Handbuch Reinhaltung der Luft. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Teil I: Einzelfeuerstätten

Die Bearbeitung von Teil I erfolgte durch:



Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

der Universität Stuttgart

(Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. K.R.G. Hein)

und

Ingenieurbüro Dr. Struschka, Weissach

Michael Struschka

Dieter Straub

Günter Baumbach

IVD, Pfaffenwaldring 23, D-70569 Stuttgart

Tel. 0711-685-3487, Fax 0711-685-3491

Internet: http://www.ivd.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

Seite:

1 Einleitung ... 111

2 Abbrandverhalten von Festbrennstoffen ... 112

3 Ausgangssituation - Größenverteilungen der Partikelemissionen ... 114

4 Abbrandversuche an Einzelfeuerstätten ... 116

4.1 Untersuchungsprogramm ... 116

4.2 Versuchsaufbau und Messtechnik ... 118

4.3 Beschreibung der untersuchten Einzelfeuerstätten ... 121

4.4 Angaben zu den verfeuerten Brennstoffen ... 124

4.5 Versuchsauswertung ... 124

5 Untersuchungsergebnisse ... 125

5.1 Dauerbrandöfen ... 125

5.2 Heizeinsatz für Kachelöfen ... 130

5.3 Kamineinsatz ... 136

5.4 Kaminofen ... 139

5.5 Pelletofen (Kaminofen) ... 143

6 Zusammengefasste Ergebnisse ... 145

7 Literatur ... 148

1 Einleitung

Bei der Verbrennung von festen Brennstoffen in kleinen Feuerungsanlagen können grundsätzlich folgende Emissionen entstehen:

Produkte vollständiger Verbrennung:	Kohlendioxid, Wasser
Nebenprodukt bei vollständiger Verbrennung:	Stickstoffoxide
Produkte aus Brennstoffinhaltsstoffen:	z.B. Aschepartikel, Stickstoff- und Schwefeloxide
Produkte unvollständiger Verbrennung:	Kohlenmonoxid, gasförmige und kondensierte organische Verbindungen, Ruß.

Die durch Brennstoffinhaltsstoffe und als Nebenprodukte bei vollständiger Verbrennung entstehenden Emissionen von Stickstoff- und Schwefelverbindungen werden wesentlich von den Stickstoff- und Schwefelgehalten im Brennstoff, deren Bindungsformen, dem Schwefeleinbindungsvermögen der Brennstoffasche sowie in geringerem Maße von den Verbrennungsbedingungen (z.B. Temperatur- und Sauerstoffverteilung) beeinflusst.

Die Höhe der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung wird ausschließlich von den Verbrennungsbedingungen bestimmt. Neben der Feuerungs- und Beschickungsart beeinflussen

die Feuerraumkonstruktion:	z.B. Luftführung, Leistung und Belastung, Geometrie
die Brennstoffeigenschaften:	z.B. Wassergehalt, Stückgröße
und das Betreiberverhalten:	z.B. Aufgabehäufigkeit und -menge von Brennstoff, Veränderung und Einstellung der Verbrennungsluft-Teilströme

den Verbrennungsprozess und damit die Höhe der Schadstoffemissionen.

Die Partikelemissionen von chargenweise beschickten Feuerungen für feste Brennstoffe setzen sich aus Asche- und Rußpartikeln sowie kondensierten höhermolekularen organischen Verbindungen zusammen, treten aber meist als Kombination von Fest-Flüssig-Phasen auf. Dies bedeutet, dass an den emittierten Ruß- und Aschepartikeln organische Verbindungen kondensieren bzw. von diesen adsorbiert werden. Dieser Übergang der höhersiedenden organischen Verbindungen von der Gasphase in die flüssige (bei sehr tiefen Gastemperaturen auch in die feste) Phase ist abhängig von der Temperatur, dem Siedepunkt der Verbindung, deren Konzentration bzw. der Konzentration von Kondensationskeimen und der Aufenthaltszeit in den entsprechenden Temperatur- und Konzentrationsfeldern.

So ändert sich die Konzentration und die Zusammensetzung der Partikel in der Gasphase innerhalb der Feuerungsanlage (diese besteht aus der Feuerstätte, dem Abgasrohr und dem Schornstein) in Abhängigkeit der Randbedingungen (z.B. Temperaturverlauf). Deshalb ist bei der Bestimmung der Partikelemission der Probenahmeort und das Probenahmeverfahren von besonderer Bedeutung (z.B. Jaasma et al. (1990) und Struschka et al., 2001).

2 Abbrandverhalten von Festbrennstoffen

Die Verbrennung von festen Brennstoffen stellt eine Kombination verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse (Trocknung - thermische Zersetzung - homogene Oxidations- und Reduktionsreaktionen - heterogene Verbrennung des festen Kohlenstoffes) dar. Im Feuerraum der Einzelfeuerstätten laufen diese Prozesse nach der Brennstoffaufgabe gleichzeitig, aber mit unterschiedlicher Intensität ab.

In **Bild 2.1** sind typische Verläufe der CO_2-, CO- und VOC-Konzentrationen im Abgas bei der Verbrennung von Buchenholzscheiten in einem Kachelofen-Heizeinsatz und einem Kaminofen dargestellt. Bei chargenweise beschickten Feuerungen ist zuerst eine Anbrennphase mit niedriger Feuerraumtemperatur und niedriger CO_2-Konzentration und meist hohen Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas erkennbar. Der Anteil dieser Verbrennungsphase am Gesamtabbrand kann sich, in Abhängigkeit des verwendeten Holzbrennstoffes und der konstruktiven Ausführung der Feuerstätte, im Bereich von 4 % bis über 10 % bewegen. Lang andauernde Anbrennphasen mit hohen Kohlenwasserstoff- und Partikelkonzentrationen bestimmen maßgeblich das Emissionsverhalten der Geräte bezüglich dieser Komponenten.

In der anschließenden Hauptverbrennungsphase werden meist hohe CO_2-Gehalte im Abgas erreicht. In dieser Phase des Abbrandes können zeitweise örtliche Luftmangelsituationen unterschiedlicher Ausprägung auftreten, die erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung zur Folge haben. Die Hauptverbrennungsphase hat im allgemeinen einen Anteil von 30 bis 40 % am Gesamtabbrand.

In der Ausbrandphase nimmt der CO_2-Gehalt im Abgas, der ein Maß für den Brennstoffumsatz darstellt, und damit die Verbrennungstemperatur deutlich ab. Deshalb treten in dieser Verbrennungsphase wieder höhere CO-Emissionen auf. Niedrige Feuerraumbelastungen und damit auch niedrige Feuerraumtemperaturen in der Hauptverbrennungsphase führen dazu, dass der Brennstoff in der Ausbrandphase noch nicht vollständig thermisch zersetzt ist. In diesen Fällen steigen die Kohlenwasserstoffemissionen ebenfalls an. Durch die meist lange Dauer der Ausbrandphase - der Anteil dieser Verbrennungsphase bewegt sich zwischen 50 bis 66 % des Gesamtabbrandes - trägt diese erheblich zur CO-Gesamtemission (und ggf. auch zur VOC-Gesamtemission) der Feuerung bei.

Bei der Verbrennung von Stein- und Braunkohlenbrennstoffen in Feuerstätten mit Dauerbrandeigenschaften, z.B. Dauerbrand-Heizeinsätze oder Dauerbrandöfen, können sich die Anteile der einzelnen Verbrennungsphasen in Abhängigkeit der Feuerstättenkonstruktion und der Betriebsweise ändern.

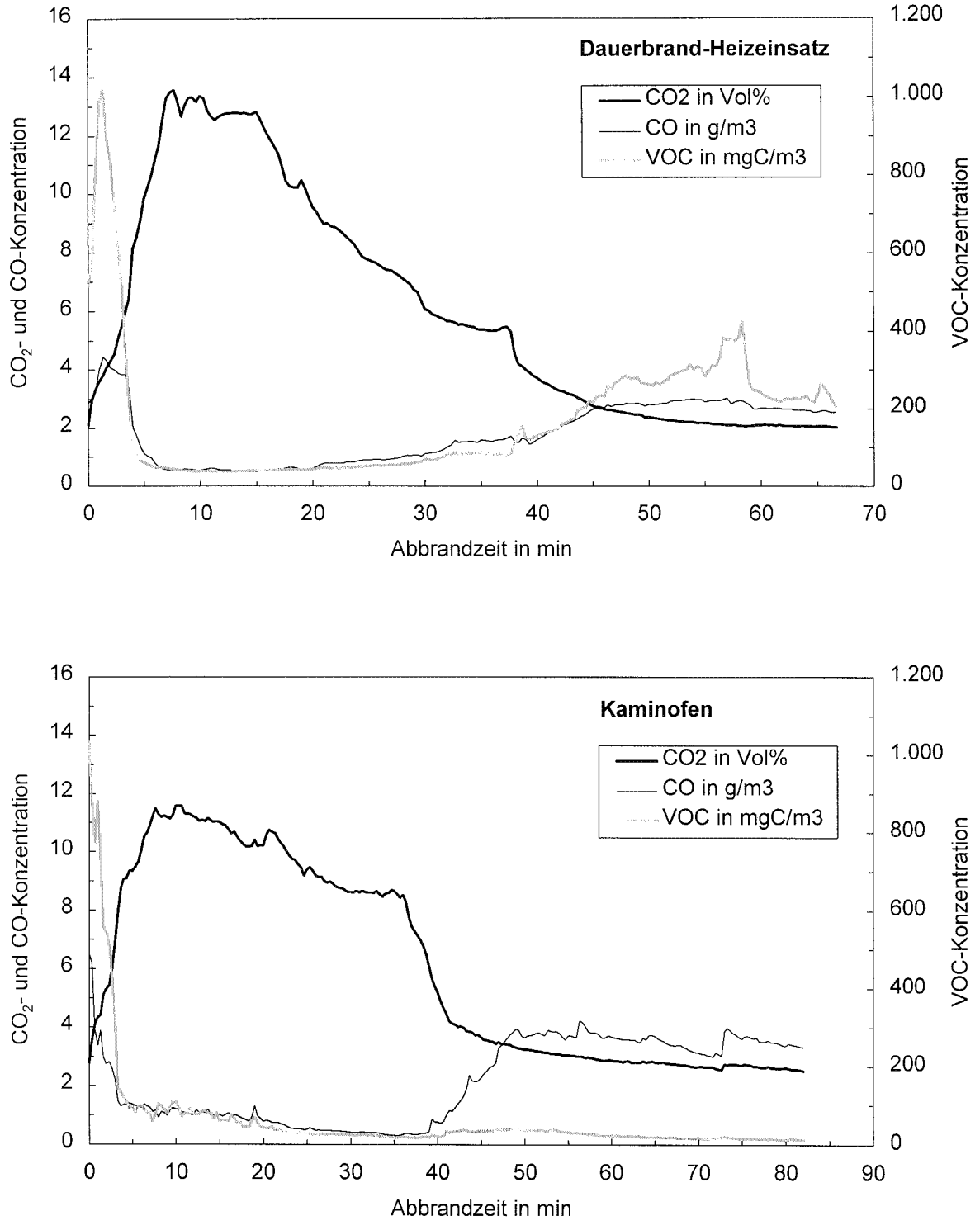


Bild 2.1: Typische Verläufe der CO_2-, CO- und VOC-Konzentrationen im Abgas unterschiedlicher Feuerstätten beim Abbrand von Buchenholzscheiten

3 Ausgangssituation - Größenverteilungen der Partikelemissionen

Neben eigenen Untersuchungen zur Größenverteilung der Partikelemissionen von Einzelfeuerstätten wurden entsprechende Messungen vor allem vom Landesamt für Umweltschutz in Sachsen-Anhalt durchgeführt, die im folgenden beschrieben werden. Die Ergebnisse der eigenen bisher durchgeführten Partikelmessungen sind in Kapitel 5 zusammen mit den aktuellen Messergebnissen aus diesem Vorhaben aufgeführt.

Das Landesamt für Umweltschutz in Sachsen-Anhalt (LAU, 1998 bis 2000) führte umfangreiche Untersuchungen zur Größenverteilung von Partikeln im Abgas eines Durchbrand-Kohleraumheizers (Dauerbrandofen) durch, der mit Baschkirischen, Mitteldeutschen, Lausitzer und Polnischen Braunkohlenbriketts befeuert wurde. Bei den Abbrandversuchen erfolgte die Partikelprobenahme im unteren Bereich des Schornsteins bei Abgastemperaturen im Bereich von 300 °C über einen Zeitraum von etwa 30 bis 60 Minuten. Des weiteren wurde bei einigen Brennstoffen untersucht, wie sich eine Abkühlung des heißen Abgases auf die Partikelgrößenverteilung auswirkt. Hierzu wurde in einer Kühlstrecke die Temperatur des Abgases auf etwa 60 °C reduziert.

Die Brennstoffaufgabe für einen Abbrandzyklus von 270 Minuten erfolgte in zwei gleichen Teilen. Nach dem Anbrennen von Papier und Anzündholz in der kalten Feuerung wurde die Hälfte der gesamten Brennstoffmenge aufgegeben. Die Aufgabe des restlichen Brennstoffs erfolgte nach einer Abbranddauer von 30 Minuten. Die Wärmeleistung der Feuerung lag bei den Abbrandversuchen etwa 40 % über der vom Hersteller angegeben Nennwärmeleistung des Heizgerätes von 6 kW.

In **Bild 3.1** sind die mittleren Größenverteilungen der Partikel im heißen Abgas für den Kohleraumheizer beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus den vier genannten Revieren dargestellt (nach LAU, 1998 bis 2000).

Für die vier untersuchten Braunkohlenbriketts sind beim Kohleraumheizer keine wesentlichen Unterschiede in der Größenverteilung der Partikel im heißen Abgas zu erkennen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass bei den einzelnen Versuchsreihen die berechneten Trenndurchmesser für die einzelnen Stufen des Impaktors nicht exakt identisch sind. Deshalb wurde die Größenverteilung der Partikel in Bild 3.1 in Abhängigkeit der Trennstufe dargestellt. Die entsprechenden mittleren Trenndurchmesser sind in **Tabelle 3.1** aufgelistet.

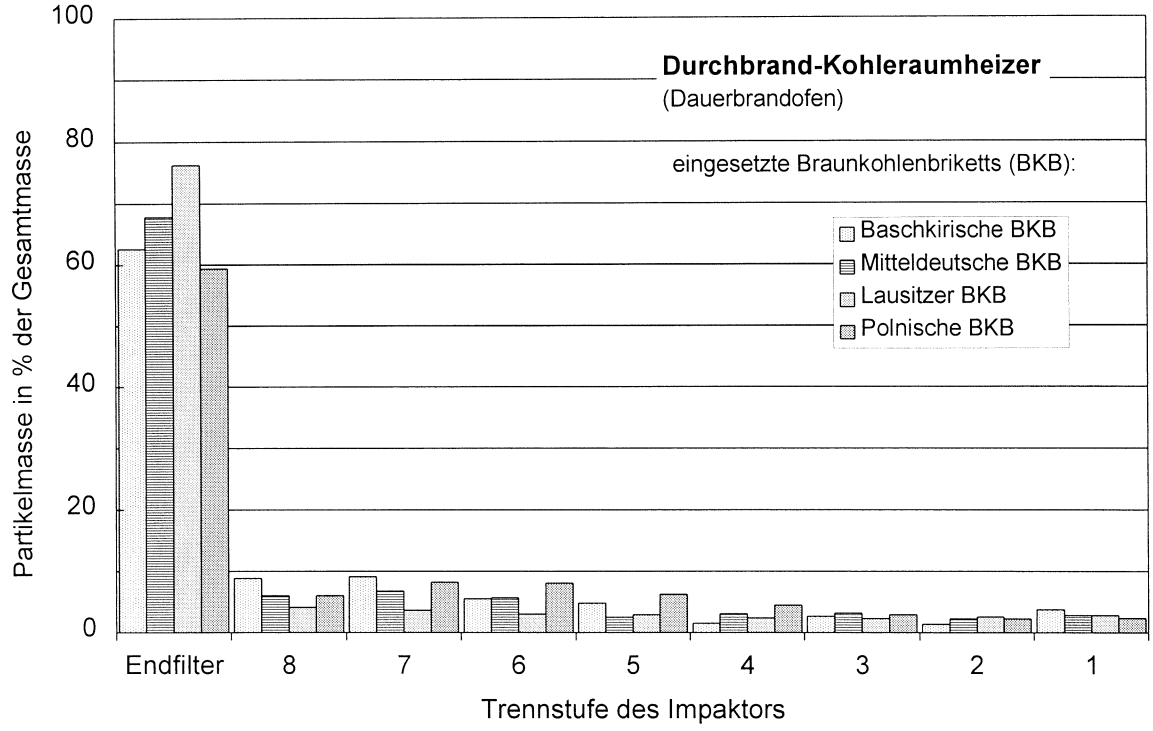


Bild 3.1: Größenverteilung der Partikel in Abhängigkeit der Trennstufe des Impaktors beim Durchbrand-Kohleraumheizer für unterschiedliche Braunkohlenbriketts (nach LAU, 1998 bis 2000)

Tabelle 3.1: Mittlere Trenndurchmesser für die in Bild 3.1 dargestellten Abbrandversuche mit dem Durchbrand-Kohleraumheizer (nach LAU, 1998 bis 2000)

Trennstufe	Trenndurchmesser in µm für die Versuche mit Braunkohlenbriketts aus den Revieren			
	Baschkirien	Mitteldeutschland	Lausitz	Polen
Endfilter	< 0,7	< 1,1	< 1,0	< 0,8
8	0,7	1,1	1,0	0,8
7	1,0	1,5	1,5	1,1
6	1,7	2,5	2,4	1,9
5	3,5	5,0	4,8	3,7
4	5,5	7,9	7,6	6,0
3	7,7	11,5	11,1	8,7
2	11,8	16,5	15,9	12,5
1	> 17,7	> 24,4	> 23,5	> 18,9

In **Tabelle 3.2** sind für den Kohleraumheizer beim Betrieb mit den unterschiedlichen Braunkohlenbriketts die ermittelten Anteile der Partikelfraktionen PM_x mit aerodynamischen Durchmessern von <= 1 µm (PM_1), <= 2,5 µm ($PM_{2,5}$) und <= 10 µm (PM_{10}) aufgelistet (eigene Berechnungen nach LAU, 1998 bis 2000).

Tabelle 3.2: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Durchbrand-Kohleraumheizer (Dauerbrandofen) beim Betrieb mit unterschiedlichen Braunkohlenbriketts (eigene Berechnungen nach LAU, 1998 bis 2000)

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % für die Versuche mit Braunkohlenbriketts aus den Revieren			
	Baschkirien	Mitteldeutschland	Lausitz	Polen
PM_1	71,8	67,8	76,3	63,2
$PM_{2,5}$	83,1	80,5	84,1	76,4
PM_{10}	93,8	90,5	91,6	93,4

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Durchbrand-Kohleraumheizer beim Betrieb mit den verschiedenen Braunkohlenbriketts gut vergleichbar. Als Mittelwert für alle Braunkohlenbriketts beträgt der Anteil der Fraktion PM_1 an der gesamten Partikelemission rund 70 % bei einer Bandbreite von 63,2 bis 76,3 %. Die Mittelwerte für die Partikelfraktionen $PM_{2,5}$ bzw. PM_{10} betragen rund 81 bzw. 92 %, bei Bandbreiten von 76,4 bis 84,1 % bzw. 90,5 bis 93,8 %.

4 Abbrandversuche an Einzelfeuerstätten

Schwerpunktmäßig wurden in diesem Vorhaben Emissionsmessungen durchgeführt. Diese Messungen stellen die Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} dar. Die Ergebnisse der Partikelmessungen liegen bei diesen Prüfstandsuntersuchungen in der Regel als Mittelwerte von zweien bei unveränderten Randbedingungen nacheinander durchgeführten Messungen vor.

Um auch die Anteile kondensierbarer organischer Verbindungen zu erfassen und um unabhängig von der Bauart der Feuerstätte und deren Betriebsbedingungen konstante und vergleichbare Verhältnisse zu erreichen, erfolgt bei den Einzelfeuerstätten und beim Stückholzkessel mit veralteter Verbrennungstechnik (siehe Teil III der Messberichte) die Probenahme zur Bestimmung der Partikelemissionen im **verdünnten** Abgas.

4.1 Untersuchungsprogramm

Der Bestand an Einzelfeuerstätten in Deutschland stellt aufgrund seiner über viele Jahrzehnte gewachsenen Struktur eine sehr inhomogene Gruppe dar, die sich nicht vollständig erfassen lässt. So reicht die Bandbereite der installierten Einzelfeuerstätten für feste Brennstoffe von Herden und Badeöfen mit ca. 4 kW Nennwärmeleistung bis zu Kachel-Grundöfen, die Feuerungswärmeleistungen bis über 30 kW aufweisen können. Außerdem gibt es neben weit verbreiteten Bauformen, z.B. Kachelofen-Heizeinsatz mit Nachheizfläche, auch seltener installierte Ausführungen wie z.B. den Kachelofen-Heizeinsatz mit Wasserwärmetauscher.

Aufgrund der langen Lebensdauer von Einzelfeuerstätten, der großen Anzahl von ehemaligen und derzeitigen Herstellern und der häufigen Modellwechsel in diesem Bereich ist ein breites, regional unterschiedliches Spektrum verschiedener Bauarten und Ausführungen, Baujahren und Leistungen bei Einzelfeuerstätten installiert.

Zur Auswahl eines für den Gesamtbestand möglichst aussagekräftigen Querschnittes an zu untersuchenden Einzelfeuerstätten wurden deshalb auch die Ergebnisse der abgeschlossenen Forschungsvorhaben zu Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen (Baumbach et al., 1999), zu Feinstaubemissionen einer mit Braunkohlenbriketts befeuerten Kleinfeuerungsanlage (Struschka et al., 2001) und zur Ermittlung von Emissionsfaktoren im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher (Pfeiffer et al., 2000) berücksichtigt. Somit können für viele Bauarten von Einzelfeuerstätten detaillierte Angaben zu den brennstoff- und lastabhängigen Partikelemissionen erfolgen. Außerdem stehen auch mehr Daten zur Verfügung, um anlagenspezifische Einflussgrößen auf die Partikelemissionen zu untersuchen und eine Bewertung der Bauarten sowie der Verbrennungstechnik vorzunehmen.

Aus der Gruppe der Einzelfeuerstätten für feste Brennstoffe, die Dauerbrandöfen, Kachelöfen (mit Heizeinsätzen oder als Grundöfen), offene Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum), Kaminöfen, Badeöfen und Herde umfasst, wurden ein Dauerbrandofen, ein Heizeinsatz, ein Kamineinsatz und ein Kaminofen für die Abbrandversuche in diesem Vorhaben ausgewählt. Für die durchgeführten Abbrandversuche an Einzelfeuerstätten ist in **Tabelle 4.1** die Versuchsmatrix aufgelistet.

Tabelle 4.1: Versuchsmatrix der Prüfstandsmessungen bei Einzelfeuerstätten (Nennwärmeleistungen < 15 kW) und Partikelprobenahme im **verdünnten** Abgas

Bauart der Feuerung	eingesetzte Brennstoffe		Anzahl der Partikelmessungen bei	
			NWL	MWL
Dauerbrandofen (ältere Verbrennungstechnik)	Steinkohlen:	Anthrazit	2	
		Steinkohlenbriketts	2	
Heizeinsatz für Kachelofen (weitverbreitete Verbrennungstechnik)	BKB:	Rheinisches Revier	2	2
		Mitteldeutsches Revier	2	2
		Böhmisches Revier	2	2
	Holzscheite:	lufttrockenes Buchenholz		2
Kamineinsatz (moderne Verbrennungstechnik)	Holzscheite:	lufttrocknes Buchenholz	2	2
Kaminofen (moderne Verbrennungstechnik)	BKB:	Rheinisches Revier	2	2
		Summe	**14**	**12**

NWL Nennwärmeleistung MWL mittlere Wärmeleistung BKB Braunkohlenbriketts

Bei Dauerbrandöfen sind überwiegend Geräte mit Baujahren vor 1988 installiert, weshalb der ausgewählte Ofen auch eine Verbrennungstechnik besitzt, die in diesem Zeitraum üblich war. Beim Kachelofen-Heizeinsatz wurde ein Gerät ausgewählt welches noch am Markt erhältlich ist und eine weitverbreitete und einfache Verbrennungstechnik aufweist.

Kamineinsätze und Kaminöfen wurden verstärkt ab Anfang der 90-Jahre verkauft. Seit einigen Jahren stellen diese Bauarten zahlenmäßig mit den größten Anteil der jährlich verkauften Einzelfeuerstätten (siehe z.B. Hartmann et al., 1995). Da auch in Zukunft mit einer noch zunehmenden Bedeutung dieser 'Komfort-Feuerstätten' gerechnet wird, sollen derzeit am Markt erhältliche Geräte mit moderner Feuerungstechnik untersucht werden.

4.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Bild 4.1 zeigt schematisch den eingesetzten Versuchsaufbau zur Verdünnung der Feuerstättenabgase, welcher nachfolgend auch als Verdünnungstunnel bezeichnet wird. Der Aufbau und Anschluss der Heizgeräte an den rund 5 m hohen isolierten Stahlschornstein, in dem sich unabhängig von den nachfolgenden Einrichtungen ein natürlicher Schornsteinzug einstellt, erfolgte in Anlehnung an die DIN 18 890 (1990) und 18 892 (1985 und 1998).

Das Abgas des Heizgerätes wird an der Schornsteinmündung in einer Abgas-Sammelhaube über zwei gegenüberliegende Öffnungen (Durchmesser jeweils 150 mm) mit Außenluft in der Regel um den Faktor 4 bis 7 verdünnt. Außenluft wird durch einen etwa 4 Meter langen flexiblen Aluminiumschlauch der Abgas-Sammelhaube ohne weitere Aufbereitung zugeführt.

Bei allen Abbrandversuchen wurden im heißen Abgas der Feuerstätten kontinuierlich die Konzentrationen von CO_2, CO, VOC, SO_2 (nur bei Kohlenbrennstoffen) und die Gastemperatur sowie der Unterdruck im Schornstein gemessen. Parallel hierzu wurde im verdünnten Abgas kontinuierlich die CO_2-Konzentration (zur Berechnung des Verdünnungsverhältnisses und zur Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt) und die Gastemperatur ermittelt.

Gleichzeitig wurde die Partikelkonzentration mit einem Planfilterkopfgerät und die Größenverteilungen der Partikel mit einem Kaskadenimpaktor jeweils als Mittelwert des Chargenabbrandes bestimmt. Das Planfilterkopfgerät konnte im verdünnten Abgas mit einer geraden Probenahmesonde angeordnet werden. Der Kaskadenimpaktor musste aufgrund seiner Größe außerhalb der Verdünnungstunnels installiert werden. Die Probenahme erfolgte hier mit einer gekrümmten Entnahmesonde. Durch die Verdünnung und Abkühlung des Abgases ist eine Beheizung des Impaktors nicht notwendig.

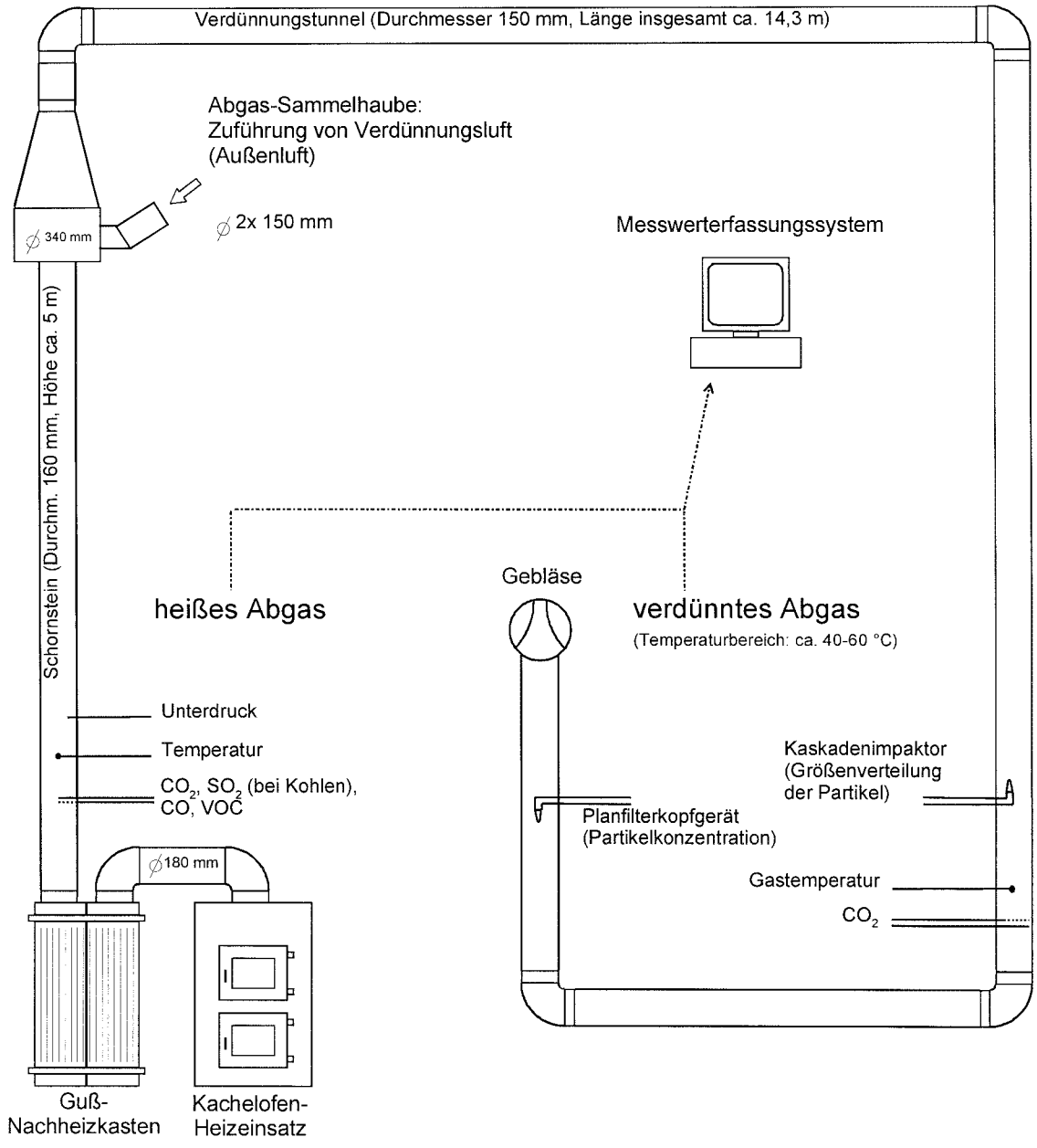


Bild 4.1: Versuchsaufbau (schematisch) zur Bestimmung der Partikelkonzentrationen und Partikelgrößenverteilungen von chargenweise beschickten Feuerungen

Die verwendeten Filtersubstrate beim Planfilterkopfgerät und beim Kaskadenimpaktor wurden vor der Probenahme wie folgt behandelt:

- vorsichtiges Abblasen der Sammelplatten sowie der End- und Planfilter mit einem trockenem Luftstrahl, um lose Fasern zu entfernen. Beschriftung der Substrate
- Ausheizen im Trockenofen für mindestens 2 Stunden bei 250 °C
- Abkühlung im Exsikkator (als Trockenmittel wird Silikagel verwendet, es wird darauf geachtet, dass sich kein Unterdruck im Exsikkator einstellt)
- Wägung der Substrate
- Aufbewahrung der Filtersubstrate in Petrischalen
- Einbau der Filtersubstrate unmittelbar vor den Messungen in gereinigten Impaktor bzw. in gereinigtes Planfilterkopfgerät.

Nach der Messung wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- vorsichtige Entnahme der Substrate aus den Probenahmegeräten zur Vermeidung von Masseverlusten durch auf den Metallträgern anhaftende Fasern
- Lagerung und Transport der Filter in Petrischalen
- Trocknung im mit Silikagel gefüllten Exsikkator für mindestens 2 Stunden
- Wägung der Substrate.

Als Waage wurde das Modell MC 1 RC 210 P der Firma Sartorius AG verwendet. Die Waage weist eine Reproduzierbarkeit und Linearitätsabweichung im genutzten Wägebereich bis 5 g von jeweils 0,02 mg auf. Die Waage ist in einem speziellen Wägeraum untergebracht.

In **Tabelle 4.2** sind die verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrate für das Planfilterkopfgerät und den Kaskadenimpaktor aufgelistet.

Tabelle 4.2: Angaben zur verwendeten Messtechnik und zu den eingesetzten Filtersubstraten bei den durchgeführten Abbrandversuchen

Messgröße (Messprinzip) und Messgerät (Typ, Hersteller)	Messbereich	Prüfgaskonzentration [2] Filtersubstrate (Typ, Hersteller)	im Bericht angegebene Größe
CO_2 (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS 100 Firma Fisher-Rosemount	0-3 Vol% und 0-20 Vol%	2,0 Vol% CO_2 in N_2 11,9 Vol% CO_2 in N_2	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): s.o.	0-3 Vol%	1,01 Vol% CO in N_2	Vol%, mg/m³ und mg/MJ
SO_2 (Strahlungsabsorption im ultravioletten Bereich): BINOS 1004 Firma Fisher-Rosemount	0-3.000 mg/m³	682 mg/m³ SO_2 in N_2	mg/m³ und mg/MJ
VOC (Flammenionisation) [1]: FID RS 55 Firma Ratfisch	0-1.000 ppm v/v	80,7 ppm v/v Propan in N_2	mgC/m³ und mgC/MJ (angegeben als Kohlenstoffmasse)
Gastemperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Partikel: Planfilterkopfgerät (Gravimetrie): Staubmesseinrichtung STE Firma Ströhlein	-	Filtersubstrate: Quartz Microfibre MK 360, 50 mm Firma Munktell Filter AB, S-Grycksbo	Partikelkonzentration mit Planfilter: mg/m³ und mg/MJ
Impaktor (Strömungstrennverfahren): Mark III (TR 76-900023, Rev. A) mit gekrümmter Entnahmesonde Firma Andersen Instruments Incorporated, Smyrna, GA, USA	-	Trennstufen: Filtereinsätze für Andersen Mark III, Firma K. Schäfer Gesellschaft für Verfahrenstechnik, D-Langen Endfilter: Glass Microfibre Filter 18279237, Grade-AH, 63 mm, Firma Whatman Internat. LtD., GB-Maidstone	Partikelgrößenverteilung: anteilige Partikelmasse in % der Trennstufen und des Endfilters bezogen auf die insgesamt im Impaktor abgeschiedene Masse
Unterdruck (Pneumatisch-elektronische Druckaufnahme): P-Sensor, Firma E. Müller	0-50 Pa	-	Pa

[1] bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas

[2] die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalysatoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

4.3 Beschreibung der untersuchten Einzelfeuerstätten

Die Abbrandversuche wurden an einem Dauerbrandofen, einem Heizeinsatz für Kachelöfen, einem Kamineinsatz und einem Kaminofen durchgeführt. Der untersuchte Dauerbrandofen ist derzeit zwar noch im Markt erhältlich, weist aber eine veraltete Verbrennungstechnik auf. Beim Heizeinsatz handelt es sich ebenfalls um ein noch am Markt vorhandenes Gerät mit einer weitverbreiteten und einfachen Verbrennungstechnik. Der Kamineinsatz und der Kaminofen wurden stellvertretend für 'Komfort-Feuerstätten' für die Untersuchungen ausgewählt. In **Tabelle 4.3** sind wichtige Merkmale zu den eingesetzten Heizgeräten aufgeführt.

Tabelle 4.3: Wichtige Merkmale der untersuchten Einzelfeuerstätten

Bauart	Dauerbrandofen	Heizeinsatz	Kamineinsatz	Kaminofen
zutreffende Norm	DIN 18 890 (Teil 1) Entwurf 1990	DIN 18 892 (Teil 1) bzw. Entwurf 1998	DIN 18 895 (Teil 1 bis 3)	DIN 18 891 bzw. Entwurf 1998
Hersteller [1]	Thorma Výroba K.S.	Buderus	Rüegg	Hagos
Typ	Top Fire Karlsbad	Kandern WB 25	Mars	Basic
Nennwärmeleistung in kW	6,0	9,0 (einschl. Nachheizkasten)	7,0	6,0
Baujahr	2000	1998	2001	1997
geeignete Brennstoffe	Stein- und Braunkohlenbrennstoffe, Scheitholz mit Einschränkungen	Stein- und Braunkohlenbriketts, Scheitholz	Scheitholz	Scheitholz, Stein- und Braunkohlenbriketts
Kurzbeschreibung	Durchbrandfeuerung mit Rost und teilweiser Feuerraumausmauerung, Verbrennungsluft mit Brennstoffwähler über Füllraumtür (SL) und Automatikregler (PL)	Durchbrandfeuerung mit Rost (beim Betrieb mit Holz wird Rost abgedeckt), vollständige Feuerraumausmauerung, Verbrennungsluft durch Füllraumtür (SL) und mit Brennstoffwähler durch Aschentür unterhalb des Rostes bzw. in Rosthöhe (PL)	Durchbrandfeuerung ohne Rost, vollständige Feuerraumausmauerung, Verbrennungsluft durch Schamotteboden (PL) und Feuerraum-Rückwand sowie unterhalb Sichtscheibe (SL)	Durchbrandfeuerung mit Rost, vollständige Feuerraumausmauerung, Verbrennungsluft oberhalb Sichtscheibe (SL) und unterhalb des Rostes (PL)

[1] oder Inverkehrbringer PL Primärluft SL Sekundärluft

Die untersuchten Feuerstätten sind in **Bild 4.2** schematisch im Schnittbild dargestellt. Mit Ausnahme des Kamineinsatzes besitzen alle Heizgeräte, da diese für die Verfeuerung von Kohlenbrennstoffen geeignet sind, einen Aschekasten und einen Rost. Die Feuerräumwände beim Heizeinsatz, Kaminofen und Kamineinsatz sind mit Schamottematerial bzw. Feuerbeton vollständig ausgekleidet. Beim Dauerbrandofen sind die seitlichen Feuerraumwände nur bis etwa halbe Höhe und die Rückwand vollständig mit Schamottesteinen versehen. Bei diesem Heizgerät wird Verbrennungsluft über einen Brennstoffwähler mit den Stellmöglichkeiten "Steinkohle, Anthrazit-Mager-Nuss 3-Koks sowie Holz" als Sekundärluft in den Feuerraum und über einen Automatikregler als Primärluft unterhalb des Rostes zugeführt. Der Brennstoffwähler ist entsprechend dem verfeuerten Brennstoff einzustellen. Mit dem Automatikregler kann die Wärmeleistung des Ofens eingestellt werden. Hierbei wird in Abhängigkeit der Ofentemperatur die unterhalb des Rostes zugeführte Verbrennungsluft geregelt.

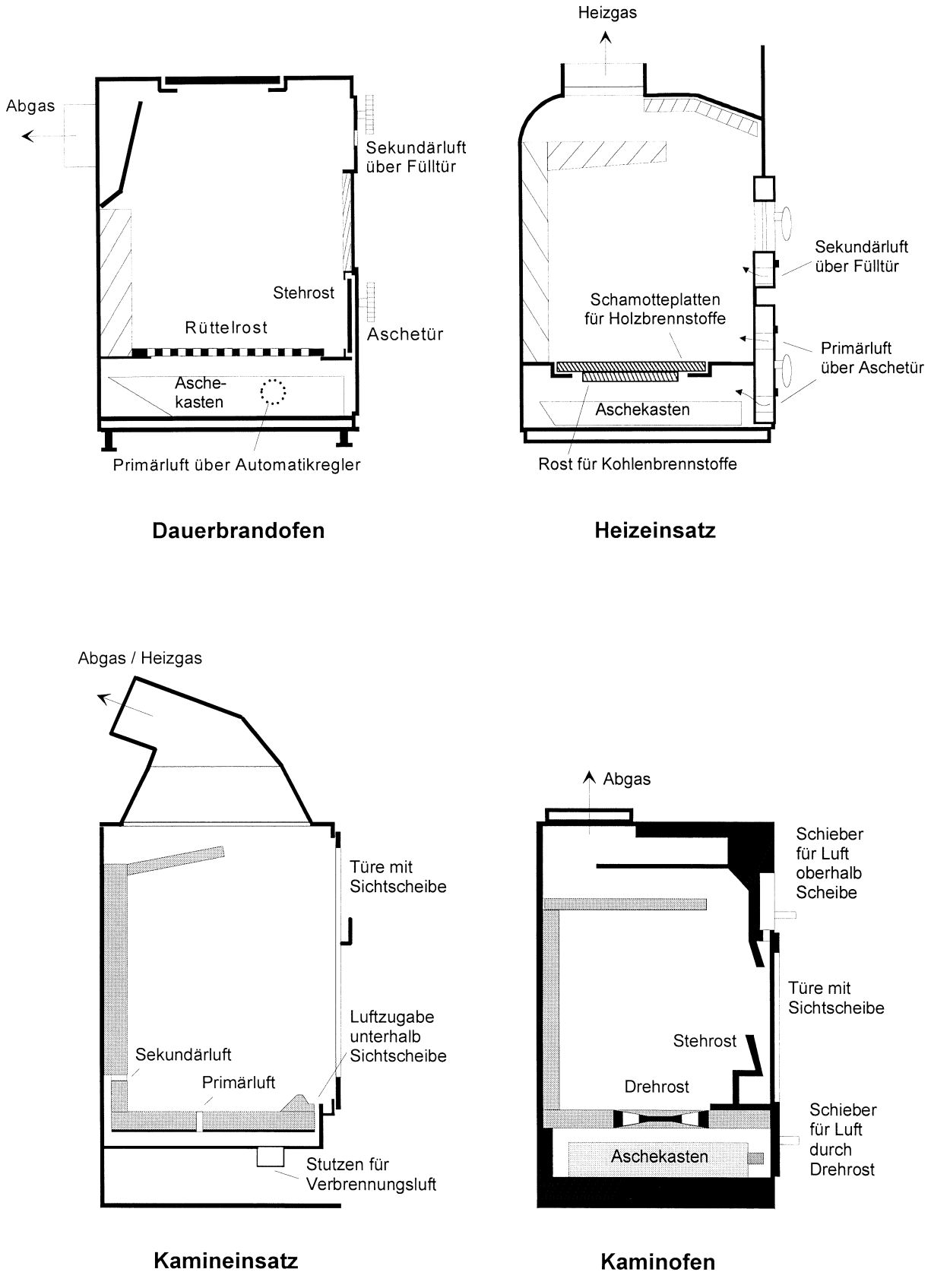


Bild 4.2: Untersuchte Einzelfeuerstätten im Schnitt

Der untersuchte Heizeinsatz entspricht in seiner Konstruktion einer einfach aufgebauten Durchbrandfeuerung. Im oberen Bereich des Feuerraumes ist ein Deckenstein aus Schamotte angebracht, durch den die Verbrennungsgase beim Austritt aus dem Feuerraum umgelenkt werden. Das Gerät besitzt 3 unabhängig voneinander einzustellende Verbrennungsluftschieber und einen Brennstoffwähler.

Die der Feuerung zugeführte Verbrennungsluft wird hierbei in eine Primärluftluft (unter dem Rost bzw. in Höhe des Rostes zugegeben) und eine Sekundärluft (als Scheibenbelüftung in der Fülltür zugegeben) aufgeteilt. Die Einstellung der Teilluftströme und des Brennstoffwählers auf der Innenseite der Aschetüre erfolgt in Abhängigkeit des verwendeten Brennstoffes. Bei Holzbrennstoffen wird der Rost durch Schamotte- und Gussplatten abgedeckt. In geringem Maße gelangt weiterhin Verbrennungsluft durch einen verbleibenden Schlitz zwischen den Abdecksteinen in den Feuerraum.

Beim Kamineinsatz sind die Seitenwände und die Rückwand des Feuerraumes vollständig mit Schamotte ausgekleidet. Ein Teil des Feuerraums wird noch von einer Schamotteplatte abgedeckt. Auf der Vorderseite des Feuerraumes befindet sich eine große, selbständig schließende Fülltür mit Sichtscheibe. In der untersuchten Ausführung besitzt das Gerät weder Aschekasten noch Rost und ist somit nur für Holzbrennstoffe geeignet.

Verbrennungsluft kann der Feuerung über flexible Rohre als Außenluft zugeführt werden. Zum Anschluss der Rohre ist ein Stutzen im Sockelunterbau des Gerätes vorhanden. Die über diesen Anschluss zugeführte Luft wird in eine Primärluftluft (über zwei Bohrungen im Schamotteboden zugegeben) und eine Sekundärluft (über Schlitze in der Rückwand des Feuerraumes und unterhalb der Fülltür als Scheibenbelüftung zugeführt) aufgeteilt. Die Einstellung der Verbrennungsluft erfolgt über eine Klappe im Verbrennungsluftstutzen, die Teilluftströme ergeben sich durch freie Querschnitte in den Luftführungen.

Beim Kaminofen mündet der Feuerraumausgang in einer kleinen Nachverbrennungszone. Die Fülltür mit Sichtscheibe ist selbständig schließend. Ober- und unterhalb der Fülltüre sind die Verbrennungsluftschieber angeordnet. Bei Kohlenbrennstoffen erfolgt eine getrennte Primär- und Sekundärluftzugabe. Primärluft wird durch den geöffneten Rüttelrost und Sekundärluft als Scheibenbelüftung in den Feuerraum geführt. Bei der Holzverbrennung wird bei betriebswarmem Heizgerät die Verbrennungsluft allerdings ausschließlich oberhalb der Sichtscheibe zugeführt. Hierbei wurde die Strömungsführung im Feuerraum so optimiert, dass ein Teil der Verbrennungsluft direkt in den Glutbereich (als Primärluft) geleitet wird und der andere Teil oberhalb der Brennstoffauflage den Verbrennungsgasen (als Sekundärluft) zugeführt wird.

Bei allen Heizgeräten erfolgte die Einstellung der Verbrennungsluft und ggf. der Brennstoffwähler für die Abbrandversuche bei Nennwärmeleistung entsprechend den Herstellerangaben. Mittlere Wärmeleistungen wurden bei den Abbrandversuchen bei unveränderter Einstellung der Geräte durch eine Reduzierung der Brennstoffaufgabemenge eingestellt.

4.4 Angaben zu den verfeuerten Brennstoffen

Tabelle 4.4 enthält eine Zusammenstellung der Elementarzusammensetzungen und weiterer charakteristischer Daten der verfeuerten Brennstoffe. Die Brennstoffzusammensetzungen basieren bei den deutschen Stein- und Braunkohlenbrennstoffen auf Angaben der Produzenten, bei den böhmischen Braunkohlenbriketts auf eigenen Analysen und beim Buchenscheitholz auf Literaturangaben und eigene Berechnungen mit dem nach DIN 52 183 (1977) ermittelten Wassergehalt des Brennstoffs.

Tabelle 4.4: Angaben zu den verfeuerten Brennstoffen (Bezugszustand: wie verbrannt)

Brennstoffe		Braunkohlenbriketts			Steinkohlenbrennstoffe Anthrazit	Briketts [2]	Buchenholz
Revier		Rheinisch	Mitteldeutsch	Böhmisch	Ibbenbüren	Ruhr	
Bezeichnung		7" [1]	Ganzstein	Einstein	Nuss 3	Extrazit 40	Stückholz
Abmessungen (ca.) [L*B*H]	[mm]	180*55*50	156*70*42	90*70*45	23 - 37	45*40*30	330*70 - 90
Stückgewicht (ca.)	[g]	570	310	300	10 - 20	40	900 - 1.300
Kohlenstoff (C)	[Massen%]	53,2	52,6	56,7	88,7	81,8	42,6
Wasserstoff (H)		4,0	4,2	4,4	2,9	3,1	5,2
Sauerstoff (O)		19,0	11,8	13,1	1,3	3,8	38,6
Schwefel (S)		0,35	2,5	0,7	0,6	1,0	< 0,04
Stickstoff (N)		0,6	0,6	1,0	1,1	1,6	0,2
Wasser (W)		19,0	16,8	17,5	2,4	1,5	13,1
Asche (A)		4,0	11,8	7,0	2,9	7,2	0,4
Heizwert (H_u)	[MJ/kg]	19,8	20,9	22,1	33,2	31,4	15,3

[1] verpackt als Kamin-Briketts

[2] Briketts mit Bindemittel Zuckerrohr-Melasse und Kartoffelstärke

4.5 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden bei den kontinuierlich erfassten Größen sämtliche registrierten 20-Sekunden-Mittelwerte ab der Brennstoffaufgabe bis zum vollständigen Abbrand des aufgegebenen Brennstoffes verwendet. Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC-, SO_2- und Partikelkonzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% O_2 im trockenen (bzw. für VOC im feuchten) Abgas erfolgte mittels der gemessenen CO_2-Konzentration nach folgender Formel (1. BImSchV, 2001):

$$E_B = CO_{2,max} * \frac{21 - O_{2,B}}{21 * CO_{2,M}} * E_M \qquad [mg/m^3] \qquad (4.1)$$

mit:
- E_B: Emissionskonzentration, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
- E_M: im Abgas gemessene mittlere Emissionskonzentration
- $O_{2,B}$: Bezugssauerstoffgehalt (hier: 13 Vol%)
- $CO_{2,max}$: maximale CO_2-Konzentration des Brennstoffs bei stöchiometrischer Verbrennung
- $CO_{2,M}$: im Abgas gemessene mittlere Kohlendioxidkonzentration in Vol%.

Die Emissionskonzentrationen wurden zusätzlich auf energiebezogene Werte nach folgender Formel umgerechnet:

$$E_{Hu} = E_B * V_B / H_u \qquad [mg/MJ \text{ bzw. } kg/TJ] \qquad (4.2)$$

mit: E_{Hu}: auf Heizwert bezogener Emissionsfaktor in mg/MJ bzw. kg/TJ
E_B: Emissionskonzentration, siehe Formel (4.1)
V_B: spezifisches Abgasvolumen im Normzustand (je nach Messgröße "feucht" oder "trocken") bei 13 Vol% O_2 in m^3/kg
H_u: Heizwert des Brennstoffes in MJ/kg.

Der Umrechnungsfaktor V_B / H_u hängt von der Brennstoffzusammensetzung und dem Bezug auf trockenes (für die Messgrößen CO, Partikel und SO_2) oder feuchtes Abgas (für die Messgröße VOC) ab. Das brennstoffspezifische Abgasvolumen wurde mit den in Tabelle 4.4 angegebenen Elementarzusammensetzungen berechnet. Mit den ebenfalls genannten Heizwerten ergeben sich für Messgrößen die im trockenen bzw. feuchten Abgas bestimmt werden die in **Tabelle 4.5** aufgelisteten Faktoren V_B / H_u.

Tabelle 4.5: Umrechnungsfaktoren V_B / H_u zur Berechnung der heizwertbezogenen Emissionsfaktoren nach Formel 4.2 für die bei den Abbrandversuchen eingesetzten Brennstoffe

Umrechnungsfaktoren V_B / H_u für	Braunkohlenbriketts aus den Revieren			Steinkohlenbrennstoffe		Buchenholz
	Rheinland	Mitteldeutschland	Böhmen	Anthrazit	Briketts	
CO, Partikel und SO_2	0,67	0,67	0,67	0,67	0,65	0,67
VOC	0,71	0,70	0,70	0,68	0,66	0,71

5 Untersuchungsergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse der Abbrandversuche für die einzelnen Bauarten der untersuchten Feuerstätten vorgestellt. Mit aufgeführt sind jeweils die Ergebnisse anderer Forschungsvorhaben zu den Feinstaubemissionen dieser Bauarten (siehe hierzu Tabelle 2 im einleitenden Kapitel „Aufgabenstellung und Messprogramm").

5.1 Dauerbrandöfen

Das Emissionsverhalten des in diesem Vorhaben untersuchten Dauerbrandofens wurde bei der Verbrennung von Steinkohlenbriketts und Anthrazit Nusskohle im Nennwärmeleistungsbereich erfasst. Die Geräteeinstellung wurde nach Angaben des Herstellers vorgenommen. Die Brennstoffaufgaben erfolgten auf eine Grundglut bei betriebswarmem Heizgerät. Vor der Brennstoffaufgabe wurde die Grundglut abgerüttelt und ggf. der Aschekasten geleert. Während des Chargenabbrandes erfolgten keine Regeleingriffe von Hand. In **Tabelle 5.1** sind die Ergebnisse der Abbrandversuche am Dauerbrandofen zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Abbrandversuche am Dauerbrandofen mit Steinkohlenbrennstoffen bei Nennwärmeleistung

Dauerbrandofen (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	Steinkohlenbriketts	Anthrazit Nuss 3
		Wärmeleistung:	Nennwärmeleistung	Nennwärmeleistung
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	4,3	4,0
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	4	8
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	951	1.937
	mittlere Dauer je Abbrand	min	238	242
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	31.360	33.200
heißes Abgas	CO_2	Vol%	3,8	3,3
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,03	0,04
		mg/m^3	350	538
	CO	kg/TJ	226	362
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	59	54
	VOC	kgC/TJ	39	37
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	672	367
	SO_2	kg/TJ	434	247
	Abgastemperatur	°C	322	275
	Unterdruck	Pa	18	15
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	0,62	0,60
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	46	18
	Partikel [1]	kg/TJ	30	12
	Verdünnungsfaktor	-	6,1	5,5
	Temperatur	°C	42	44
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	9,5	9,1
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	4,5	4,5
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	76	75

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

Beim Betrieb des Dauerbrandofens im Bereich etwas unterhalb der Nennwärmeleistung liegen die CO-, VOC- und Partikelemissionen für beide Steinkohlenbrennstoffe auf niedrigem Niveau. Auffällig sind hierbei vor allem die sehr geringen mittleren CO-Konzentrationen.

In **Bild 5.1** sind für den Dauerbrandofen bei der Verbrennung von Steinkohlenbriketts und Anthrazit-Steinkohle Nuss 3 die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist in dieser Darstellung als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für diese Versuche maximal 7,7 %.

Bei allen Versuchen mit den beiden Brennstoffen wurden im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 1,1 µm abgeschieden. Bei den Partikelmessungen erfolgte die Probenahme über einen kompletten Chargenabbrand von etwa 4 Stunden.

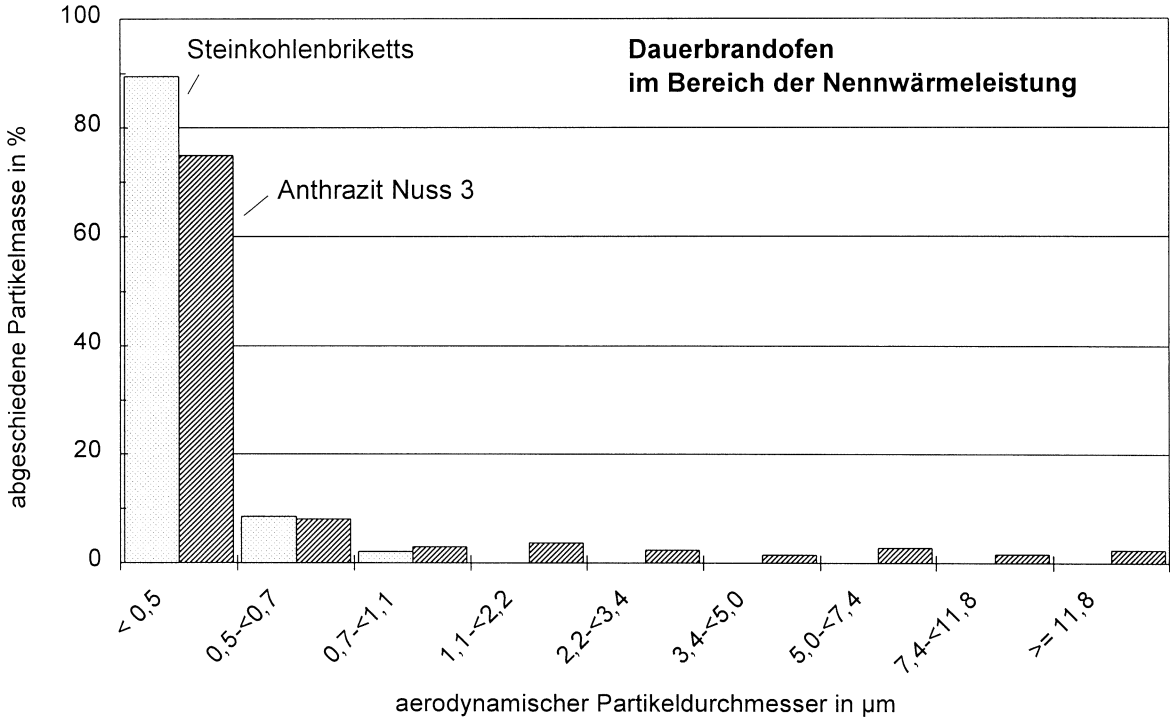


Bild 5.1: Größenverteilung der Partikel beim Dauerbrandofen bei der Verbrennung von Steinkohlenbrennstoffen (Betrieb im Bereich der Nennwärmeleistung)

Bei der Verbrennung von Steinkohlenbriketts im Dauerbrandofen konnten unter diesen Randbedingungen keine Partikel mit aerodynamischen Durchmessern über 1,1 µm nachgewiesen werden.

In **Tabelle 5.2** sind für den Dauerbrandofen die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Steinkohlenbrennstoffen berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x aufgelistet.

Tabelle 5.2: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den untersuchten Dauerbrandofen beim Betrieb mit Steinkohlenbrennstoffen im Bereich der Nennwärmeleistung

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Dauerbrandofen und Betrieb mit den Steinkohlenbrennstoffen	
	Steinkohlenbriketts	Anthrazit Nuss 3
PM_1	99,2	85,4
$PM_{2,5}$	100	90,1
PM_{10}	100	97,0

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Dauerbrandofen beim Betrieb mit den verschiedenen Steinkohlenbrennstoffen recht ähnlich. So beträgt der Anteil der PM_1-Fraktion für Steinkohlenbriketts 99,2 % und für Anthrazit 85,4 %. Da bei der Verbrennung von Steinkohlenbriketts im Dauerbrandofen keine Partikel mit aerodynami-

schen Durchmessern > 1,1 µm im Impaktor abgeschieden wurden, liegen die Anteile der Partikelfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei 100 %. Im Vergleich hierzu betragen beim Brennstoff Anthrazit Nuss 3 die $PM_{2,5}$-und PM_{10}-Anteile 90,1 bzw. 97,0 %.

In einem abgeschlossenen Vorhaben wurde das Emissionsverhalten eines Dauerbrandofens (Kohleraumheizer) mit veralteter Verbrennungstechnik aus DDR-Produktion untersucht (Struschka et al., 2001). Ziel dieses Vorhabens war zu klären, inwieweit sich die Partikelkonzentration und die Größenverteilung der Partikel im Abgas in Abhängigkeit des Abgaszustandes ändert. Durch Simulation der Ableitungs- und Austrittsbedingungen (Abkühlung des Abgases im Schornstein und anschließende Verdünnung mit Umgebungsluft) in einem Versuchsaufbau wurden die verschiedenen Abgaszustände erzeugt. An diesem Versuchsaufbau wurden vergleichende Messungen der Abgaszusammensetzung direkt am Ausgang der Feuerstätte und auf dem weiteren Abgasweg vorgenommen. Die Abbrandversuche wurden mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier durchgeführt. In **Tabelle 5.3** sind die für dieses Vorhaben relevanten Ergebnisse der Messungen am Kohleraumheizer aufgeführt.

Tabelle 5.3: Ergebnisse von Abbrandversuchen an einem Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (Struschka et al., 2001)

Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	**Braunkohlenbriketts (Lausitzer Revier)**	
		Wärmeleistung:	**mittlere Wärmeleistung**	**Nennwärmeleistung**
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	3,0	4,5
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	3	4
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	543	903
	mittlere Dauer je Abbrand	min	181	226
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	21.291	21.291
heißes Abgas	CO_2	Vol%	3,1	3,5
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,38	0,48
		mg/m^3	4.725	6.062
	CO	kg/TJ	3.118	4.001
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	362	592
	VOC	kgC/TJ	253	414
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	228	261
	SO_2	kg/TJ	151	172
	Abgastemperatur	°C	244	250
	Unterdruck	Pa	18	23
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	0,49	0,48
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	136	260
	Partikel [1]	kg/TJ	89	171
	Verdünnungsfaktor	-	6,4	7,4
	Temperatur	°C	37	46
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	5,9	7,1
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	3,2	4,2
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	68	88

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

Bei den eingestellten Wärmeleistungen lagen für diesen Ofen die CO- und VOC-Emissionen im Bereich von 0,4 bis 0,5 Vol% bzw. 360 bis 590 mgC/m^3, jeweils bezogen auf 13 Vol% O_2. Die mittleren Partikelkonzentrationen betrugen für die Abbrandversuche rund 140 mg/m^3 bei mittlerer Wärmeleistung und 260 mg/m^3 bei Nennwärmeleistung. Insgesamt nehmen beim Kohleraumheizer die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung mit der Wärmeleistung zu.

In **Bild 5.2** sind die Größenverteilungen der Partikel für den Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier bei unterschiedlichen Wärmeleistungen dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für diese Versuche maximal 2,6 %.

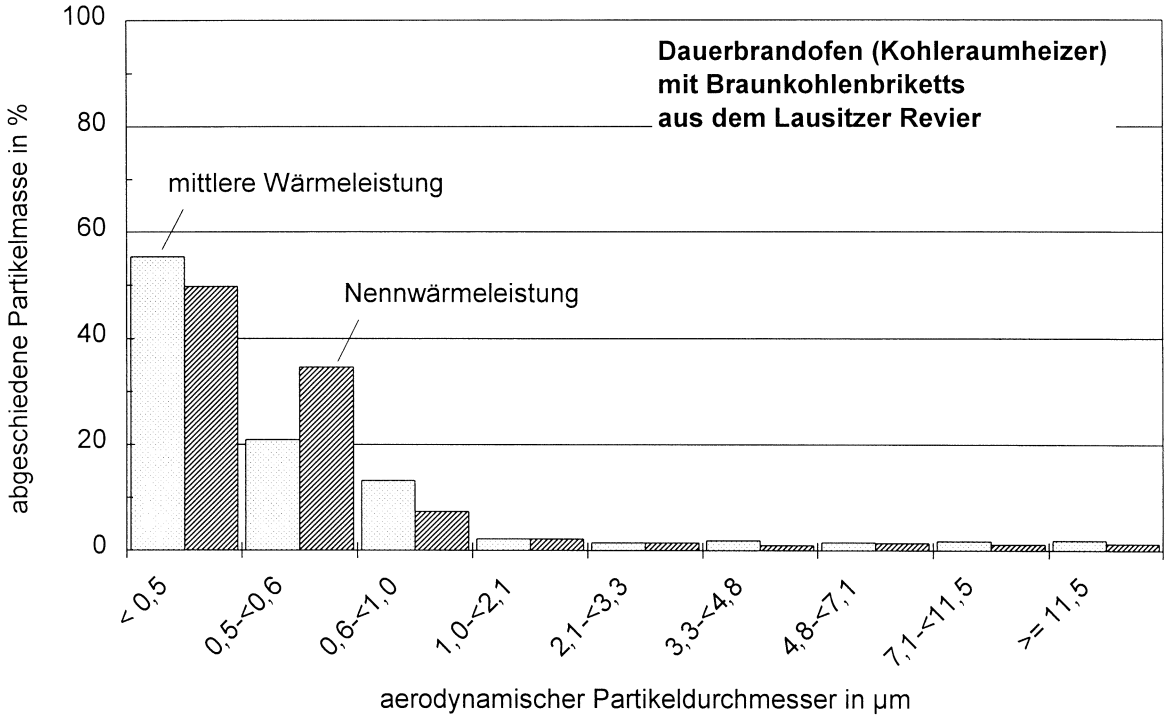


Bild 5.2: Größenverteilung der Partikel beim Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier (Struschka et al., 2001)

Bei den Verbrennungsversuchen mit Braunkohlenbriketts wurden, unabhängig von der Wärmeleistung des Kohleraumheizers, im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 1,0 µm abgeschieden. Auf den übrigen 6 Trennstufen, hier wurden Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen 1,0-<2,1 und >= 11,5 µm gesammelt, wurden bei beiden Wärmeleistungen des Ofens nur sehr geringe Anteile ermittelt.

In **Tabelle 5.4** sind für den Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} aufgelistet.

Tabelle 5.4: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier (nach Struschka et al., 2001)

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Dauerbrandofen (Kohleraumheizer) und Betrieb mit Braunkohlenbriketts (Lausitzer Revier) bei	
	mittlerer Wärmeleistung	Nennwärmeleistung
PM_1	88,7	90,7
$PM_{2,5}$	92,1	94,3
PM_{10}	97,7	98,3

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Kohleraumheizer beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier für beide untersuchten Wärmeleistung nahezu gleich. So beträgt der Anteil der PM_1-Fraktion im verdünnten Abgas bei mittlerer Wärmeleistung des Kohleraumheizers 88,7 % und bei Nennwärmeleistung 90,7 %. Bei beiden Wärmleistungen lag der Anteil der Partikelfraktion PM_{10} an der insgesamt im Impaktor gesammelten Partikelmasse bei rund 98 %.

5.2 Heizeinsatz für Kachelöfen

Das Emissionsverhalten des in diesem Vorhaben untersuchten Heizeinsatzes wurde bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus verschiedenen Revieren und Buchenholzscheiten bei mittlerer Wärmeleistung und Nennwärmeleistung ermittelt. Die Geräteeinstellung wurde für die unterschiedlichen Brennstoffe jeweils nach Angaben des Geräteherstellers vorgenommen. Die Brennstoffaufgaben erfolgten auf eine Grundglut bei betriebswarmem Heizgerät. Vor der Brennstoffaufgabe wurde bei den Braunkohlenbriketts die Grundglut abgerüttelt und ggf. der Aschekasten geleert. Während des Abbrandes der Brennstoffcharge erfolgten keine Regeleingriffe.

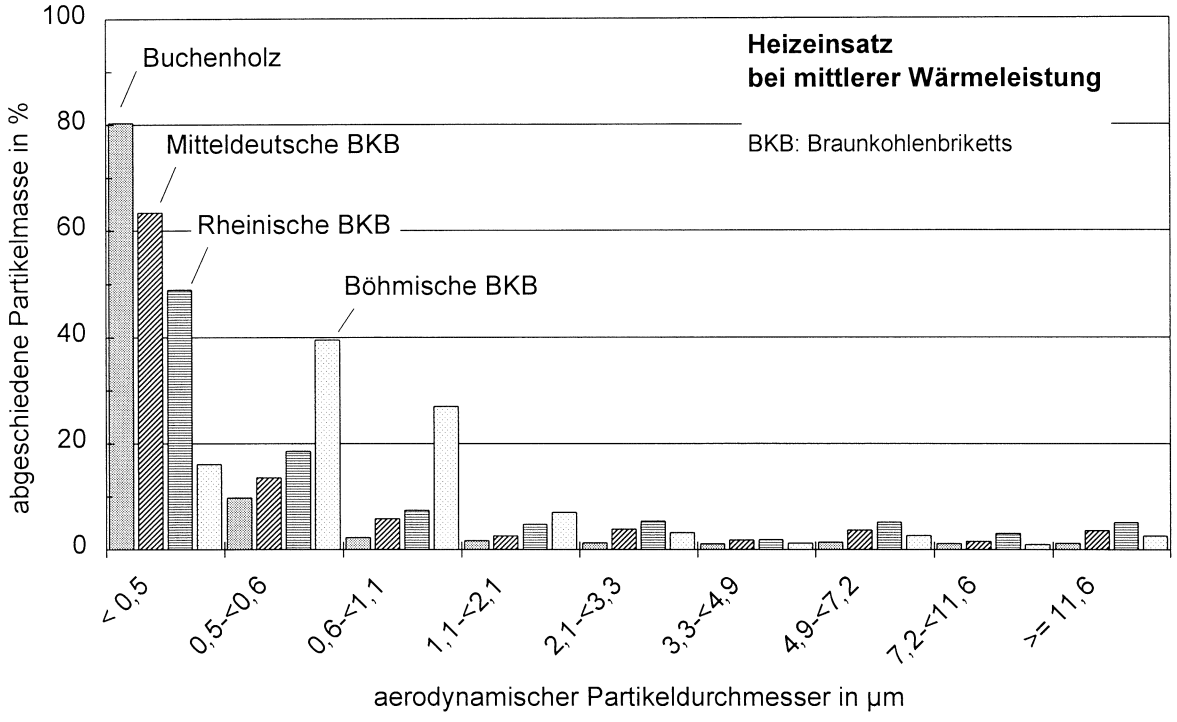
In **Tabelle 5.5** sind die Ergebnisse der Abbrandversuche am Heizeinsatz zusammengefasst dargestellt. Die mittleren CO-Konzentrationen liegen beim Heizeinsatz bei Nennwärmeleistung im Bereich von 0,22 bis 0,26 Vol%, bezogen auf 13 Vol% O_2. Bei mittlerer Wärmeleistung des Heizgerätes betragen die CO-Konzentrationen für Rheinische Braunkohlenbriketts 0,35 Vol% und für die übrigen untersuchten Brennstoffe 0,52 bis 0,58 Vol%. Die VOC- und Partikelkonzentrationen bewegen sich bei Böhmischen und Mitteldeutschen Braunkohlenbriketts bei den untersuchten Wärmeleistungen im Bereich von 327 bis 486 mgC/m^3 bzw. 412 bis 757 mg/m^3. Bei der Verbrennung von Rheinischen Braunkohlenbriketts wurden geringere VOC- und Partikelemissionen ermittelt. Die VOC-und Partikelkonzentrationen betragen hier zwischen 175 und 191 mgC/m^3 bzw. 206 und 227 mg/m^3.

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Abbrandversuche am Heizeinsatz mit Braunkohlenbriketts verschiedener Reviere und Buchenholz bei unterschiedlichen Wärmeleistungen

Heizeinsatz (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	Braunkohlenbriketts aus den Revieren						Buchenholz
			Böhmen		Mitteldeutschland		Rheinland		
		Wärmeleistung:	MWL	NWL	MWL	NWL	MWL	NWL	MWL
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	5,0	7,0	5,0	7,0	5,0	7,0	2,5
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	2	2	2	2	2	2	6
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	478	478	538	480	481	482	559
	mittlere Dauer je Abbrand	min	239	239	269	240	241	241	93
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	22.100	22.100	20.900	20.900	19.800	19.800	15.255
heißes Abgas	CO_2	Vol%	3,5	3,7	1,9	3,0	3,0	5,3	2,3
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,53	0,26	0,52	0,22	0,35	0,24	0,58
		mg/m^3	6.676	3.261	6.525	2.800	4.410	2.965	7.285
	CO	kg/TJ	4.481	2.189	4.372	1.876	2.973	1.999	4.846
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	486	327	425	439	175	191	510
	VOC	kgC/TJ	342	230	299	309	124	135	364
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	341	337	1.797	1.666	119	91	-
	SO_2	kg/TJ	229	226	1.204	1.117	80	61	-
	Abgastemperatur	°C	170	165	124	158	158	172	149
	Unterdruck	Pa	14	17	36	41	25	28	29
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	1,31	0,91	0,71	1,14	1,53	1,49	0,87
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	522	412	757	547	227	206	187
	Partikel [1]	kg/TJ	351	276	507	367	153	139	125
	Verdünnungsfaktor	-	3,0	4,1	2,6	2,6	2,0	3,5	3,9
	Temperatur	°C	41	39	47	57	48	49	40
Wärmeleistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	7,7	10,8	6,5	10,2	6,9	9,6	6,8
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	5,5	7,9	4,1	7,1	4,6	7,5	4,0
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	61	88	46	79	51	83	44

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen
MWL mittlere Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

In **Bild 5.3** sind für den Heizeinsatz bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts unterschiedlicher Reviere und Buchenholz die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel bei mittlerer Wärmeleistung und bei Nennwärmeleistung dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist hierbei als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für die Versuche bei mittlerer Wärmeleistung maximal 3,4 % und bei den Versuchen mit Nennwärmeleistung maximal 8,6 %.



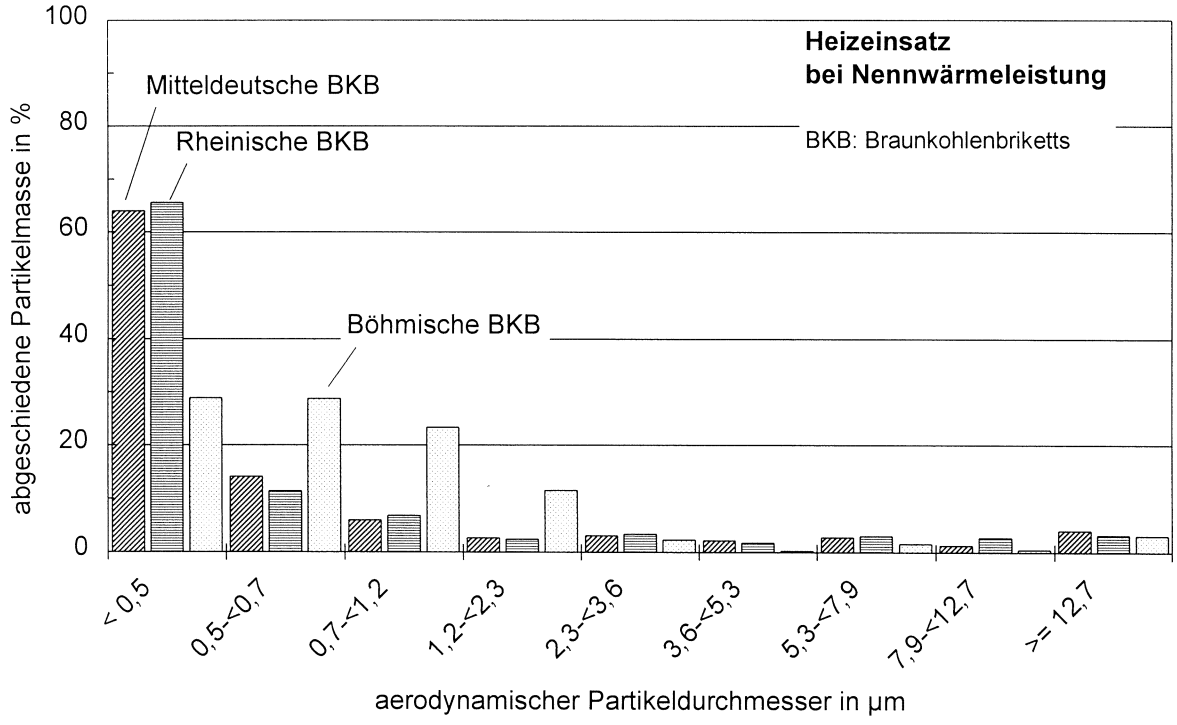


Bild 5.3: Größenverteilung der Partikel beim Heizeinsatz bei der Verbrennung von unterschiedlichen Braunkohlenbriketts und Buchenholz (Betrieb bei mittlerer Wärmeleistung und im Bereich der Nennwärmeleistung)

Bei den Abbrandversuchen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen und Mitteldeutschen Revier sowie mit Buchenholz wurden im Impaktor unabhängig von der Wärmeleistung des Heizeinsatzes überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 1,1 bzw. < 1,2 µm abgeschieden. Beim Betrieb des Heizeinsatzes mit Böhmischen Braunkohlenbriketts ergibt sich bei beiden untersuchten Wärmleistungen eine, gegenüber den anderen Brennstoffen, unterschiedliche Verteilung der Partikelgrößen. So nimmt der Anteil der auf dem Endfilter des Impaktors abgeschiedenen Partikel (< 0,5 µm aerodynamischer Durchmesser) deutlich ab und liegt nur noch im Bereich von 20 % bei mittlerer Wärmeleistung und von 30 % bei Nennwärmleistung. Die Anteile von Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern von 0,5 bis 2,1 (mittlere Wärmeleistung) bzw. 2,3 µm (Nennwärmleistung) nehmen entsprechend zu.

In **Tabelle 5.6** sind für den Heizeinsatz die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts und Buchenholz berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} aufgelistet.

Tabelle 5.6: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den untersuchten Heizeinsatz beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts unterschiedlicher Reviere und Buchenholz bei verschiedenen Wärmeleistungen

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Heizeinsatz und Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus den Revieren						Buchen-holz
	Böhmen		Mitteldeutschland		Rheinland		
	MWL	NWL	MWL	NWL	MWL	NWL	MWL
PM_1	77,4	74,1	82,4	80,8	73,6	82,2	92,1
$PM_{2,5}$	90,3	92,8	87,2	86,5	80,8	86,9	94,4
PM_{10}	97,0	96,7	96,0	94,9	93,6	95,6	98,4

MWL mittlere Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen weisen für den Heizeinsatz beim Betrieb mit den verschiedenen Braunkohlenbriketts eine geringe Bandbreite auf. So beträgt z.B. der Anteil der PM_1-Fraktion für die Braunkohlenbriketts bei mittlerer Wärmeleistung des Einsatzes zwischen 73,6 und 82,4 % sowie bei Nennwärmeleistung zwischen 74,1 und 82,2 %.

Bei der Verbrennung von Buchenholz im Heizeinsatz wurde bei mittlerer Wärmeleistung, im Vergleich zu den Braunkohlenbriketts, ein höherer Anteil der Partikelfraktion PM_1 (92,1 %) ermittelt.

In zwei anderen abgeschlossenen Vorhaben wurde das Emissionsverhalten des Heizeinsatzes beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier und verschiedenen Holzbrennstoffen bei unterschiedlichen Wärmeleistungen untersucht. In **Tabelle 5.7** sind die für dieses Vorhaben relevanten Ergebnisse der Messungen am Heizeinsatz aufgeführt.

Tabelle 5.7: Ergebnisse von Abbrandversuchen am Heizeinsatz mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier und Holzbrennstoffen bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (Holzbrennstoffe: Baumbach et al. (1999); Braunkohlenbriketts: Struschka et al., 2001)

Heizeinsatz (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Brennstoff:	Braunkohlenbriketts (Lausitzer Revier)		Buchenholz	Fichtenholz	
			Wärmeleistung:	MWL	NWL	NWL	MWL	NWL
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand		kg	5,0	7,0	3,6	3,6	3,6
	Anzahl Abbrände insgesamt		-	5	3	5	2	1
	Dauer insgesamt alle Abbrände		min	1.200	718	378	204	87
	mittlere Dauer je Abbrand		min	240	239	76	102	87
	Heizwert des Brennstoffes		kJ/kg	21.291	21.291	16.000	16.050	16.050
heißes Abgas	CO_2		Vol%	2,6	4,7	4,8	4,8	4,9
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)		Vol%	0,49	0,29	0,31	0,32	0,44
			mg/m^3	6.104	3.644	3.904	3.991	5.471
	CO		kg/TJ	4.031	2.407	2.575	2.644	3.625
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)		mgC/m^3	287	295	228	302	162
	VOC		kgC/TJ	200	205	161	215	116
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)		mg/m^3	219	225	-	-	-
	SO_2		kg/TJ	144	149	-	-	-
	Abgas- / Heizgastemperatur (beim Holz)		°C	147	203	290	288	314
	Unterdruck		Pa	20	17	8	8	15
verdünntes Abgas	CO_2		Vol%	0,52	0,65	0,79	0,47	0,87
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]		mg/m^3	141	82	77	85	47
	Partikel [1]		kg/TJ	93	54	51	56	31
	Verdünnungsfaktor		-	5,0	7,2	6,0	11,0	5,6
	Temperatur		°C	54	56	42	22	46
Wärmeleistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)		kW	7,4	10,4	12,8	9,5	11,2
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)		kW	5,4	7,8	9,4	6,8	8,2
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL		%	60	87	104	75	91

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen
MWL mittlere Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts sowie Buchen- und Fichtenholz bei mittlerer Wärmeleistung und im Bereich der Nennwärmeleistung wurden mittlere CO-Konzentrationen von 0,29 bis 0,49 Vol% ermittelt. Die geringste VOC-Konzentration (162 mgC/m^3) wurde bei diesen Versuchen mit Fichtenholz und Betrieb der Feuerung bei Nennwärmeleistung gemessen. Bei den anderen Versuchen mit Braunkohlenbriketts oder Holzbrennstoffen lagen die VOC-Konzentrationen zwischen 228 und 302 mgC/m^3, ,jeweils bezogen auf 13 Vol% O_2. Die mittleren Partikelkonzentrationen betrugen für die Abbrandversuche zwischen 47 mg/m^3 bei Nennwärmeleistung mit Fichtenholz als Brennstoff und 141 mg/m^3 bei mittlerer Wärmeleistung mit Lausitzer Braunkohlenbriketts.

In **Bild 5.4** sind die Größenverteilungen der Partikel für den Heizeinsatz beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier und Holzbrennstoffen bei unterschiedlichen Wärmeleistungen dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für die Versuche bei mittlerer Wärmeleistung maximal 5,5 % und bei den Versuchen mit Nennwärmeleistung maximal 6,1 %.

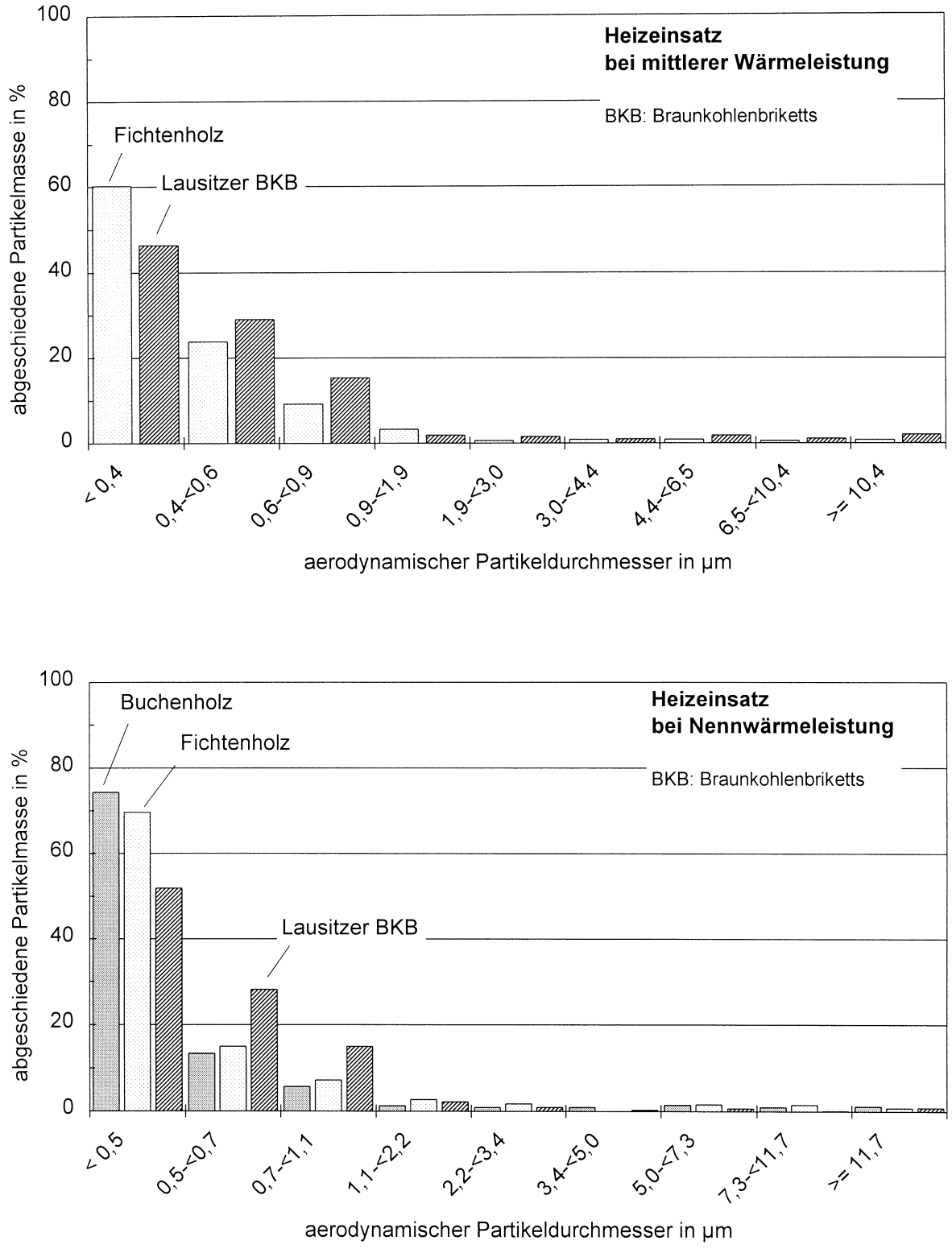


Bild 5.4: Größenverteilung der Partikel beim Heizeinsatz bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier und Holzbrennstoffen bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (Hölzer: Baumbach et al. (1999); Briketts: Struschka et al., 2001)

Bei allen Abbrandversuchen wurden, unabhängig von der Wärmeleistung des Heizeinsatzes, im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von etwa < 1,0 µm abgeschieden. Auf den übrigen 6 Trennstufen des Impaktors, hier wurden Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen rund > 1,0 und >= 10,4 µm gesammelt, wurden bei beiden Wärmeleistungen des Einsatzes nur sehr geringe Anteile ermittelt.

In **Tabelle 5.8** sind für den Heizeinsatz die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier und mit Holzbrennstoffen berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x aufgelistet.

Tabelle 5.8: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Heizeinsatz beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts des Lausitzer Reviers und Holzbrennstoffen (Hölzer: Baumbach et al. (1999); Briketts: Struschka et al., 2001)

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Heizeinsatz und Betrieb mit				
	Lausitzer Braunkohlenbriketts		Buchenholz	Fichtenholz	
	MWL	NWL	NWL	MWL	NWL
PM_1	90,9	92,7	92,1	93,3	91,8
$PM_{2,5}$	93,6	97,5	94,9	96,8	95,2
PM_{10}	98,8	99,1	98,5	99,2	98,9

MWL mittlere Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Heizeinsatz beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Lausitzer Revier sowie Fichten- und Buchenholz für beide untersuchten Wärmeleistung nahezu gleich. So liegt der Anteil der PM_1-Fraktion im verdünnten Abgas bei mittlerer Wärmeleistung zwischen 90,9 und 93,3 % und bei Nennwärmeleistung zwischen 91,8 und 92,7 %. Bei beiden Wärmleistungen und allen untersuchten Brennstoffen lag der Anteil der Partikelfraktion PM_{10} an der insgesamt im Impaktor gesammelten Partikelmasse bei rund 99 %.

5.3 Kamineinsatz

Das Emissionsverhalten des in diesem Vorhaben untersuchten Kamineinsatzes wurde bei der Verbrennung von Buchenholz und Betrieb bei mittlerer Wärmeleistung sowie im Bereich der Nennwärmeleistung erfasst. Die Geräteeinstellung erfolgte nach Angaben des Herstellers. Die Brennstoffaufgaben erfolgten auf eine Grundglut bei betriebswarmem Heizgerät. Während des Chargenabbrandes erfolgten keine Regeleingriffe.

In **Tabelle 5.9** sind die Ergebnisse der Abbrandversuche am Kamineinsatz zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Abbrandversuche am Kamineinsatz mit Buchenholz bei mittlerer Wärmeleistung und im Bereich der Nennwärmeleistung

Kamineinsatz (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	Buchenholz	
		Wärmeleistung:	mittlere Wärmeleistung	Nennwärmeleistung
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	2,5	3,0
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	6	6
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	344	329
	mittlere Dauer je Abbrand	min	57	55
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	15.255	15.255
heißes Abgas	CO_2	Vol%	3,8	6,5
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,54	0,35
		mg/m^3	6.757	4.392
	CO	kg/TJ	4.495	2.922
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	449	282
	VOC	kgC/TJ	320	201
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	-	-
	SO_2	kg/TJ	-	-
	Abgastemperatur	°C	265	326
	Unterdruck	Pa	34	29
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	0,57	1,93
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	338	284
	Partikel [1]	kg/TJ	225	189
	Verdünnungsfaktor	-	7,0	3,6
	Temperatur	°C	38	45
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	11,1	13,9
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	5,6	8,7
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	80	124

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

Die CO-, VOC- und Partikelemissionen sind beim Kamineinsatz bei der Verbrennung von Buchenholzscheiten bei beiden untersuchten Wärmeleistungen relativ hoch. Die Ursachen hierfür sind in einer ungünstigen Verbrennungsluftführung im Feuerraum und in einer unbefriedigenden Regelcharakteristik der im Verbrennungsluftstutzen untergebrachten Klappe zu sehen.

In **Bild 5.5** sind für den Kamineinsatz bei der Verbrennung von Buchenholz die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel für den Betrieb bei mittlerer Wärmeleistung und bei Nennwärmeleistung dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist in dieser Darstellung als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für diese Versuche höchstens 2,6 %. Bei allen Abbrandversuchen mit Buchenholz wurden im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 1,0 µm abgeschieden.

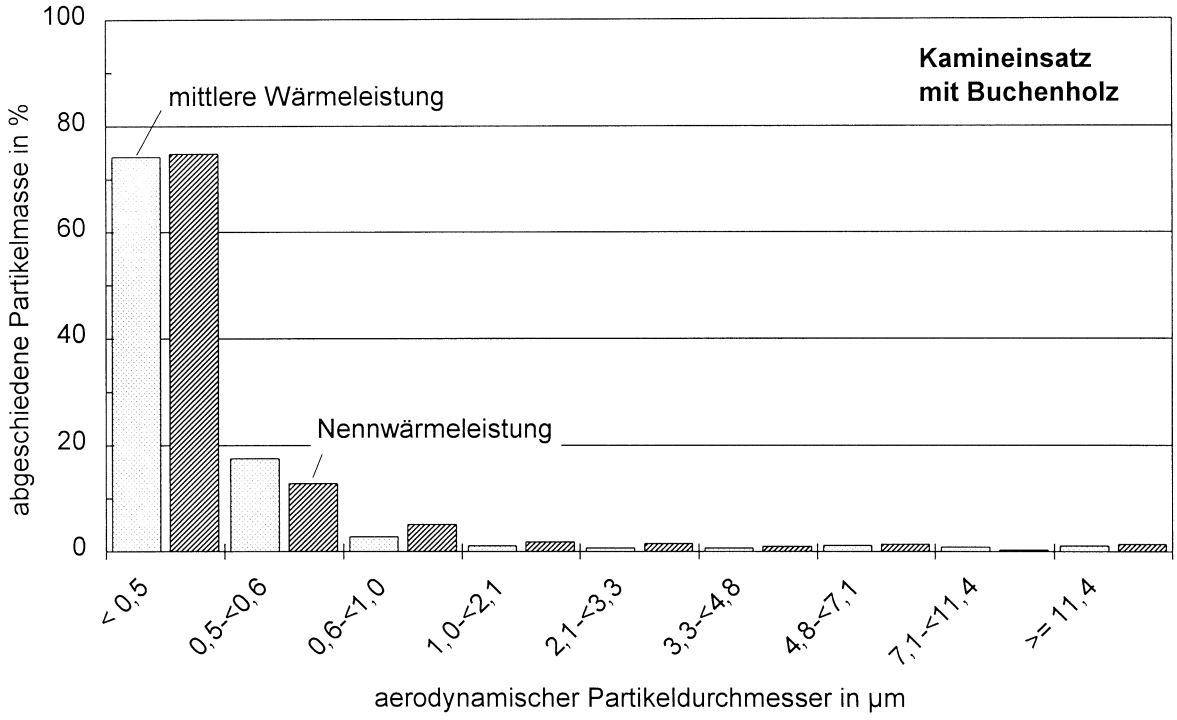


Bild 5.5: Größenverteilung der Partikel beim Kamineinsatz bei der Verbrennung von Buchenholz und Betrieb bei verschiedenen Wärmeleistungen

In **Tabelle 5.10** sind für den Kamineinsatz die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Buchenholz berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x aufgelistet.

Tabelle 5.10: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den untersuchten Kamineinsatz beim Betrieb mit Buchenholz und unterschiedlichen Wärmeleistungen

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Kamineinsatz und Betrieb mit Buchenholz bei	
	mittlerer Wärmeleistung	Nennwärmeleistung
PM_1	94,2	92,3
$PM_{2,5}$	95,8	95,0
PM_{10}	98,6	98,6

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Kamineinsatz beim Betrieb mit Buchenholz nahezu gleich. So beträgt der Anteil der PM_1-Fraktion bei mittlerer Wärmeleistung 94,2 % und bei Nennwärmeleistung 92,3 %. Die Anteile der Partikelfraktion $PM_{2,5}$ betragen für die beiden untersuchten Wärmeleistungen 95,8 bzw. 95,0 %. Bei der Fraktion PM_{10} wurden für beide Wärmeleistungen gleiche Anteile ermittelt.

5.4 Kaminofen

Das Emissionsverhalten des untersuchten Kaminofens wurde bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier und Betrieb bei mittlerer Wärmeleistung sowie Nennwärmeleistung erfasst. Die Geräteeinstellung wurde nach Herstellerangaben vorgenommen. Die Brennstoffaufgaben erfolgten auf eine Grundglut bei betriebswarmem Heizgerät. Vor der Brennstoffaufgabe wurde die Grundglut abgerüttelt und ggf. der Aschekasten geleert. Während des Abbrandes der Brennstoffcharge erfolgten keine Regeleingriffe. In **Tabelle 5.11** sind die Ergebnisse der Abbrandversuche am Kaminofen dargestellt.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Abbrandversuche am Kaminofen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier bei unterschiedlichen Wärmeleistungen

Kaminofen (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	**Braunkohlenbriketts (Rheinisches Revier)**	
		Wärmeleistung:	**mittlere Wärmeleistung**	**Nennwärmeleistung**
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	1,3	2,0
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	8	8
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	475	497
	mittlere Dauer je Abbrand	min	59	62
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	19.800	19.800
heißes Abgas	CO_2	Vol%	4,1	4,9
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,19	0,18
		mg/m³	2.431	2.286
	CO	kg/TJ	1.639	1.541
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m³	167	93
	VOC	kgC/TJ	118	66
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m³	128	154
	SO_2	kg/TJ	87	104
	Abgastemperatur	°C	236	287
	Unterdruck	Pa	18	15
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	0,44	1,22
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m³	192	111
	Partikel [1]	kg/TJ	130	75
	Verdünnungsfaktor	-	9,5	4,0
	Temperatur	°C	52	59
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	7,2	10,6
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	4,6	6,6
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	77	111

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

Bei mittlerer Wärmeleistung und bei Nennwärmeleistung liegen die CO-Emissionen beim Kaminofen in der Größenordnung von 0,2 Vol%. Ein Einfluss der Wärmeleistung auf die CO-Werte ist nicht erkennbar. Die gemessenen VOC- und Partikelkonzentrationen sind dagegen deutlich von der Wärmeleistung des Ofens abhängig. So wurden bei mittlerer Wärmeleistung VOC- und Partikelkonzentrationen von rund 170 mgC/m³ bzw. 190 mg/m³, bei 13 Vol% O_2, ermittelt. Wird der Kaminofen im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben, so nehmen die VOC- und Partikelkonzentrationen ab und betragen noch etwa 90 mgC/m³ bzw. 110 mg/m³.

In **Bild 5.6** sind für den Kaminofen die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist in dieser Darstellung als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für diese Versuche maximal 4,4 %.

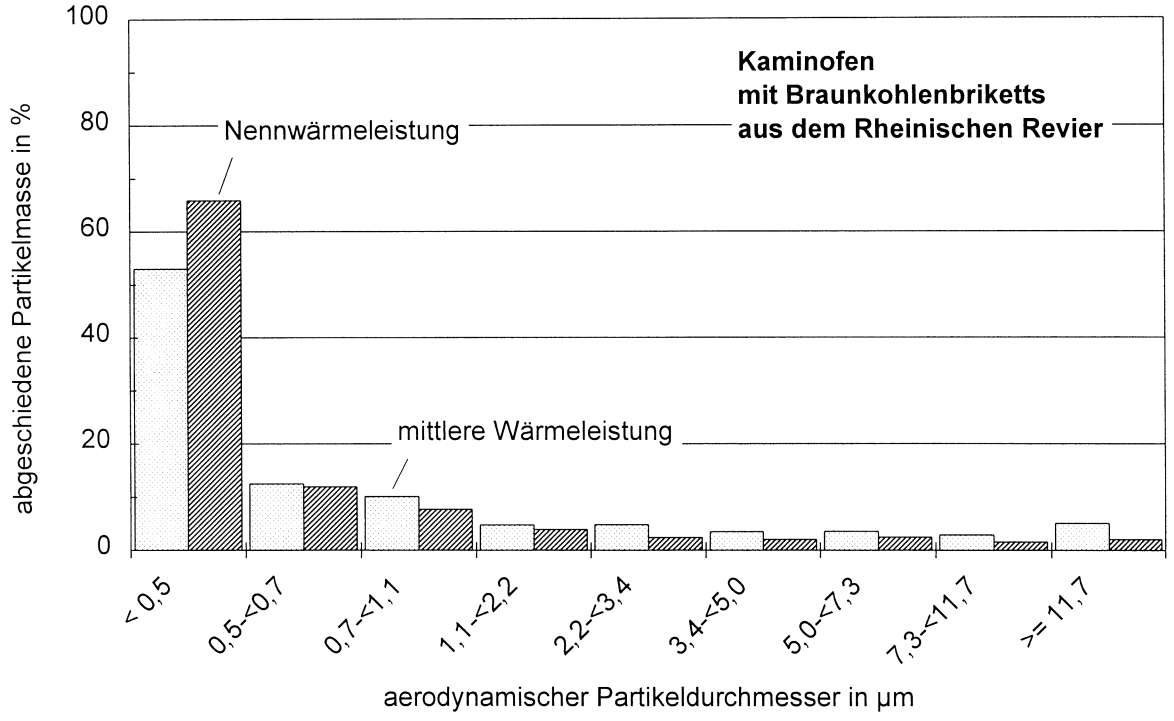


Bild 5.6: Größenverteilung der Partikel beim Kaminofen bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier bei unterschiedlichen Wärmeleistungen

Bei allen Abbrandversuchen mit den Rheinischen Braunkohlenbriketts wurden im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 1,1 µm abgeschieden. Auf den übrigen 6 Trennstufen, hier wurden Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen 1,1-<2,2 und >= 11,7 µm gesammelt, wurden bei beiden Wärmeleistungen des Ofens nur sehr geringe Anteile an der insgesamt im Impaktor abgetrennten Partikelmasse ermittelt.

In **Tabelle 5.12** sind für den Kaminofen die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Rheinischen Braunkohlenbriketts berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} aufgelistet. Beim Kaminofen und Betrieb mit Rheinischen Braunkohlenbriketts zeigen sich für die mittlere Wärmeleistung und die Nennwärmeleistung geringe Unterschiede bei den Anteilen der einzelnen Partikelfraktionen. So beträgt z.B. der Anteil der PM_1-Fraktion für die mittlere Wärmeleistung 73,1 % und für die Nennwärmeleistung 84,9 %. Auch bei den Anteilen der PM_{10}-Fraktion sind zwischen den beiden untersuchten Wärmeleistungen nur geringe Abweichungen feststellbar. Bei mittlerer Wärmeleistung wurde der Anteil für diese Fraktion mit 93,6 % und bei Nennwärmeleistung mit 97,5 % ermittelt.

Tabelle 5.12: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den untersuchten Kaminofen beim Betrieb mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Kaminofen und Betrieb mit Braunkohlenbriketts (Rheinisches Revier) bei	
	mittlerer Wärmeleistung	Nennwärmeleistung
PM_1	73,1	84,9
$PM_{2,5}$	81,3	90,3
PM_{10}	93,6	97,5

Im Rahmen eines anderen Vorhabens wurden auch Abbrandversuche an diesem Kaminofen mit Buchenholzscheiten durchgeführt (Baumbach et al., 1999). **Tabelle 5.13** zeigt die für dieses Vorhaben relevanten Ergebnisse dieser Messungen.

Tabelle 5.13: Ergebnisse von Abbrandversuchen am Kaminofen mit Buchenholz bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (nach Baumbach et al., 1999)

Kaminofen (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	**Buchenholz**	
		Wärmeleistung:	**mittlere Wärmeleistung**	**Nennwärmeleistung**
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	1,3	2,0
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	2	2
	Dauer insgesamt alle Abbrände	min	271	240
	mittlere Dauer je Abbrand	min	54	60
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	16.000	16.000
heißes Abgas	CO_2	Vol%	4,1	5,3
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,36	0,35
		mg/m^3	4.513	4.374
	CO	kg/TJ	2.977	2.885
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	399	180
	VOC	kgC/TJ	282	127
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	-	-
	SO_2	kg/TJ	-	-
	Abgastemperatur	°C	229	283
	Unterdruck	Pa	10	11
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	0,70	0,97
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	104	98
	Partikel [1]	kg/TJ	69	64
	Verdünnungsfaktor	-	6,1	5,4
	Temperatur	°C	42	46
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	6,4	8,9
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	4,1	5,7
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	69	96

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

Unabhängig von den eingestellten Wärmeleistungen lagen beim Kaminofen die CO- bzw. Partikelkonzentrationen im Bereich von 0,4 Vol% bzw. 100 mg/m^3, jeweils beim Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol%. Bei den VOC-Konzentrationen ist der Einfluss der Wärmeleistung des Ofens bei den Abbrandversuchen erkennbar. Bei mittlerer Wärmeleistung betrug die VOC-Konzentration rund 400 mgC/m^3 und bei Nennwärmeleistung gingen die VOC-Werte auf 180 mgC/m^3 zurück.

In **Bild 5.7** sind die Größenverteilungen der Partikel für den Kaminofen beim Betrieb mit Buchenholzscheiten bei unterschiedlichen Wärmeleistungen dargestellt. Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist als Mittelwert der Versuchsreihen wiedergegeben. Die Standardabweichung der aerodynamischen Durchmesser beträgt für diese Versuche maximal 7,4 %.

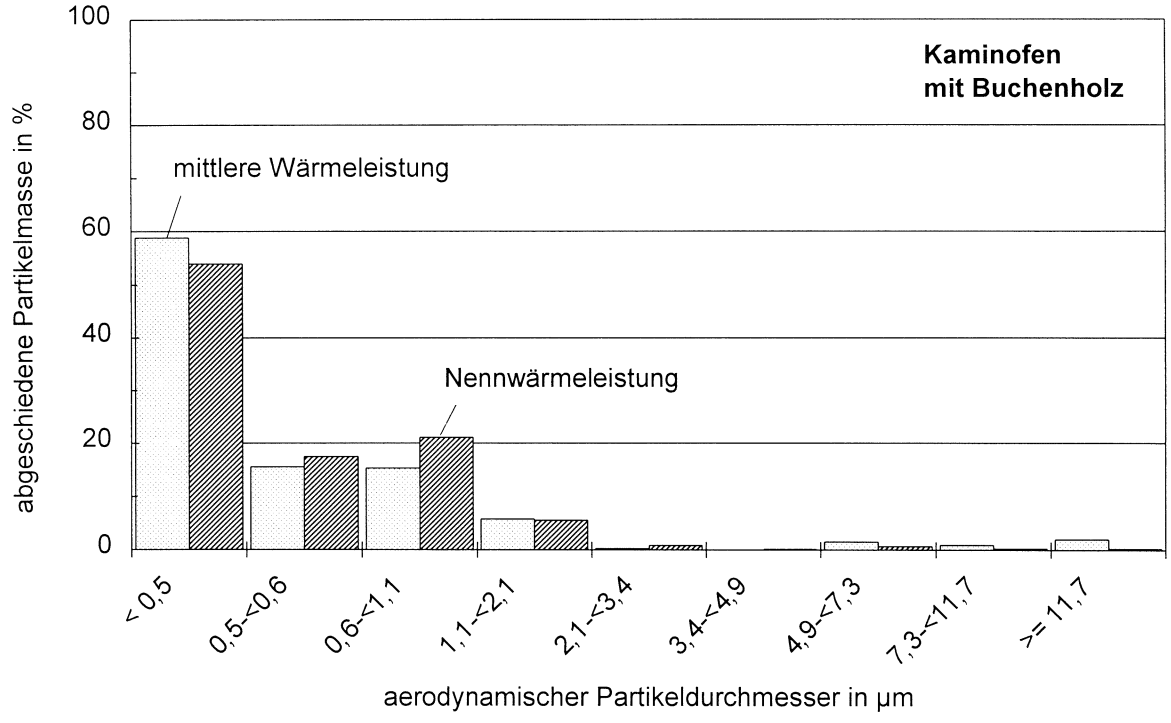


Bild 5.7: Größenverteilung der Partikel beim Kaminofen bei der Verbrennung von Buchenscheitholz bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (nach Baumbach et al., 1999)

Bei den Verbrennungsversuchen mit Buchenscheitholz wurden, unabhängig von der Wärmeleistung des Kaminofens, im Impaktor überwiegend Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 2,1 µm abgeschieden. Auf den übrigen 5 Trennstufen, hier wurden Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen 2,1-<3,4 und >= 11,7 µm gesammelt, wurden bei beiden Wärmeleistungen des Ofens nur sehr geringe Anteile ermittelt.

In **Tabelle 5.14** sind für den Kaminofen die aus den Einzelversuchen beim Betrieb mit Buchenholz berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x aufgelistet.

Tabelle 5.14: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Kaminofen beim Betrieb mit Buchenholz (nach Baumbach et al., 1999)

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Kaminofen und Betrieb mit Buchenholz bei	
	mittlerer Wärmeleistung	Nennwärmeleistung
PM_1	88,0	88,5
$PM_{2,5}$	95,5	98,2
PM_{10}	97,8	99,7

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Kaminofen beim Betrieb mit Buchenholz für beide untersuchten Wärmeleistung nahezu gleich. So beträgt der Anteil der PM_1-Fraktion im verdünnten Abgas bei mittlerer Wärmeleistung des Ofens 88,0 % und bei Nennwärmeleistung 88,5 %. Bei den beiden Wärmleistungen lagen die Anteile der Partikelfraktion PM_{10} an der insgesamt im Impaktor gesammelten Partikelmasse bei 97,8 bzw. 99,7 %.

5.5 Pelletofen (Kaminofen)

Im Rahmen der bereits zitierten Arbeit von Baumbach et al. (1999) wurden auch Abbrandversuche an einem modernen Pelletofen durchgeführt, der mit Holzpellets (Größengruppe HP 5) nach DIN 51 731 (1996) bei Nennwärmeleistung betrieben wurde.

Bei diesem Ofen werden die Holzpellets mittels einer Schnecke aus einem Vorratsbehälter in den Brennertopf befördert. Ein Rost umschließt den Brennertopf, unterhalb des Rostes befindet sich ein Aschekasten. Im Brennertopf wird der Brennstoff mit der zugeführten Verbrennungsluft verbrannt. Aschebestandteile werden in regelmäßigen Abständen durch eine Erhöhung des Verbrennungsluftstromes aus dem Brennertopf herausgeblasen und fallen dann in den Aschekasten. Das Gerät besitzt ein Abgasgebläse, der Feuerraum ist teilweise ausschamottiert und über eine große Tür mit Sichtscheibe zugänglich. Die Wärmeleistung des Heizgerätes kann im Bereich von ca. 30 bis 100% der Nennwärmeleistung kontinuierlich dem momentanen Wärmebedarf angepasst werden. Die der Feuerung zugeführte Verbrennungsluftmenge wird gemessen und auf die Wärmeleistung abgestimmt.

In **Tabelle 5.15** sind die für dieses Vorhaben relevanten Ergebnisse der Messungen am Pelletofen aufgeführt. Beim Betrieb mit Nennwärmeleistung wurden beim Pelletofen CO- und VOC-Emissionen im Bereich von 0,02 Vol% bzw. 14 mgC/m^3, jeweils bezogen auf 13 Vol% O_2, ermittelt. Die Partikelkonzentration betrug hierbei nur 17 mg/m^3.

In **Bild 5.8** ist die Größenverteilung der im Abgas des Pelletofens gemessenen Partikel für den Betrieb mit Holzpellets bei Nennwärmeleistung dargestellt.

Tabelle 5.15: Ergebnisse von Abbrandversuchen an einem Pelletofen mit Holzpellets bei Nennwärmeleistung (nach Baumbach et al., 1999)

Pelletofen (Kaminofen) (Mittelwerte der Versuchsreihe)		Brennstoff:	**Holzpellets**
		Wärmeleistung:	**Nennwärmeleistung**
allgemeine Angaben	Brennstoffmenge je Abbrand	kg	50,0
	Anzahl Abbrände insgesamt	-	1
	Dauer insgesamt	min	1.418
	Heizwert des Brennstoffes	kJ/kg	17.290
heißes Abgas	CO_2	Vol%	5,5
	CO (bez. auf 13 Vol% O_2)	Vol%	0,02
		mg/m^3	252
	CO	kg/TJ	165
	VOC (bez. auf 13 Vol% O_2)	mgC/m^3	14
	VOC	kgC/TJ	10
	SO_2 (bez. auf 13 Vol% O_2)	mg/m^3	-
	SO_2	kg/TJ	-
	Abgastemperatur	°C	192
	Unterdruck	Pa	5
verdünntes Abgas	CO_2	Vol%	1,08
	Partikel (bez. auf 13 Vol% O_2) [1]	mg/m^3	17
	Partikel [1]	kg/TJ	11
	Verdünnungsfaktor	-	5,0
	Temperatur	°C	35
Wärme-leistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	10,2
	Wärmeleistung (WL=FWL*Wirkungsgrad)	kW	8,0
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	94

[1] angegeben sind die mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen

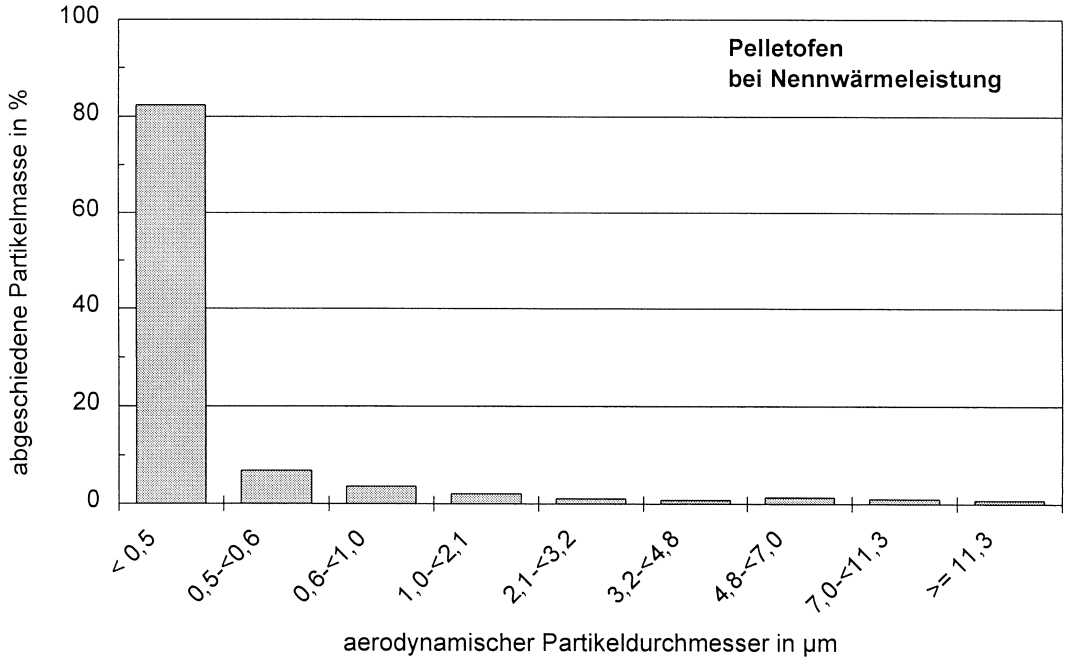


Bild 5.8: Größenverteilung der Partikel beim Pelletofen bei der Verbrennung von Holzpellets bei Nennwärmeleistung (nach Baumbach et al., 1999)

Auch beim Pelletofen machen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von < 1,0 µm den weitaus größten Anteil an der im Impaktor insgesamt abgeschiedenen Partikelmasse aus. Größere Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen1,0 und >= 11,3 µm haben nur einen Anteil von wenigen Prozent an der gesamten Partikelemission. In **Tabelle 5.16** sind für den Pelletofen die mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x aufgelistet.

Tabelle 5.16: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Pelletofen bei Nennwärmeleistung (nach Baumbach et al., 1999)

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Pelletofen (Kaminofen) bei Nennwärmeleistung
PM_1	92,7
$PM_{2,5}$	95,4
PM_{10}	99,0

6 Zusammengefasste Ergebnisse

Ein besonderer Schwerpunkt in diesem Vorhaben lag in der Durchführung von Emissionsmessungen. Diese Messungen sind Grundlage zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}. Um auch die Anteile kondensierbarer organischer Verbindungen zu erfassen, erfolgte bei den Einzelfeuerstätten die Probenahme zur Bestimmung der Partikelemissionen im verdünnten Abgas. Die Ergebnisse der Partikelmessungen liegen bei den Prüfstandsuntersuchungen in der Regel als Mittelwerte von zweien bei unveränderten Randbedingungen nacheinander durchgeführten Messungen vor.

Der Bestand an Einzelfeuerstätten in Deutschland stellt aufgrund seiner über viele Jahrzehnte gewachsenen Struktur, der großen Anzahl von ehemaligen sowie derzeitigen Herstellern, der häufigen Modellwechsel und der langen Lebensdauer der Heizgeräte eine sehr inhomogene Gruppe dar, die sich nicht vollständig erfassen lässt. Um einen möglichst aussagekräftigen Querschnitt aus dem Gesamtbestand der installierten Einzelfeuerstätten zu erhalten, wurden Abbrandversuche an einem Dauerbrandofen, einem Heizeinsatz für Kachelöfen, einem Kamineinsatz und einem Kaminofen durchgeführt. Die Messergebnisse in diesem Vorhaben werden ergänzt durch Ergebnisse aus bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben. Somit können für relativ viele Bauarten von Einzelfeuerstätten detaillierte Angaben zu den Partikelemissionen erfolgen.

Zur Berechnung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x der Einzelfeuerstätten im Hauptteil des Endberichtes werden die in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Ergebnisse von Abbrandversuchen herangezogen. In **Tabelle 6.1** sind die Anteile der Partikelfraktionen nochmals zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 6.1: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für Einzelfeuerstätten

Bauart der Feuerstätte	Brennstoff		Wärme-leistung	Anteil der Fraktion in %		
	Art	Bezeichnung		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Dauerbrandofen [1] (Westdeutschland)	Steinkohle	Anthrazit Nuss 3	NWL	85,4	90,1	97,0
	Steinkohlenbriketts	Extrazit 40		99,2	100	100
Dauerbrandöfen [2] (Kohleraumheizer, Ostdeutschland)	Braunkohlenbriketts der Reviere	Lausitz	*MWL*	*88,7*	*92,1*	*97,7*
			NWL [3]	83,5	89,2	95,0
		Mitteldeutschland	NWL	67,8	80,5	90,5
		Baschkirien		71,8	83,1	93,8
		Polen		63,2	76,4	93,4
Heizeinsatz für Kachelöfen	Braunkohlenbriketts der Reviere	Rheinland	*MWL*	*73,6*	*80,8*	*93,6*
			NWL	82,2	86,9	95,6
		Lausitz	*MWL*	*90,9*	*93,6*	*98,8*
			NWL	92,7	97,5	99,1
		Mitteldeutschland	*MWL*	*82,4*	*87,2*	*96,0*
			NWL	80,8	86,5	94,9
		Böhmen	*MWL*	*77,4*	*90,3*	*97,0*
			NWL	74,1	92,8	96,7
	Holzbrennstoffe	Buchenholz	*MWL*	*92,1*	*94,4*	*98,4*
			NWL	92,1	94,9	98,5
		Fichtenholz	*MWL*	*93,3*	*96,8*	*99,2*
			NWL	91,8	95,2	98,9
Kamineinsatz	Holzbrennstoff	Buchenholz	*MWL*	*94,2*	*95,8*	*98,6*
			NWL	92,3	95,0	98,6
Kaminofen	Braunkohlenbriketts des Reviers	Rheinland	*MWL*	*73,1*	*81,3*	*93,6*
			NWL	84,9	90,3	97,5
	Holzbrennstoff	Buchenholz	*MWL*	*88,0*	*95,5*	*97,8*
			NWL	88,5	98,2	99,7
Pelletofen (Kaminofen)	Holzbrennstoff	Pellets	NWL	92,7	95,4	99,0

[1] der Dauerbrandofen steht stellvertretend für den Anlagenbestand in Westdeutschland
[2] die Kohleraumheizer stehen stellvertretend für den Anlagenbestand in Ostdeutschland
[3] Mittelwert aus Angaben der Tabellen 3.2 und 5.4
MWL mittlere Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Bei den untersuchten Feuerstätten und Brennstoffen sowie bei den eingestellten Wärmeleistungen betragen die Anteile der Partikelfraktion PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} im Mittel für alle dargestellten Einzelwerte der betreffenden Fraktion 84,5, 90,8 bzw. 96,9 %. Die auf die Mittelwerte der Fraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bezogenen Standardabweichungen errechnen sich zu 11,0, 6,9 und 2,5 %. Somit werden bei der Verbrennung von Steinkohlen-, Braunkohlen- und Holzbrennstoffen in Einzelfeuerstätten nahezu ausschließlich Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von < 10 µm emittiert. Rund 85% der im Impaktor abgeschiedenen Partikelmasse weist sogar Durchmesser von < 1,0 µm auf.

Weiterhin ist fest zu stellen, dass die Größenverteilungen der Partikel im verdünnten Abgas nur unwesentlich von der Bauart der Feuerstätte, der Wärmeleistung und den Verbrennungsbedingungen, und damit der Partikelkonzentration, abhängen. So ergeben sich z.B. bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen im Heizeinsatz nahezu die gleichen Anteile der Partikelfraktionen PM_x im Abgas wie bei der Verbrennung von Holzpellets im Pelletofen. Die Partikelkonzentration beträgt für den Heizeinsatz bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen im Mittel rund 100 mg/m^3 und für den Pelletofen 17 mg/m^3, jeweils bei 13 Vol% O_2.

Einen erkennbaren Einfluss auf die Größenverteilung der Partikel hat der verwendete Brennstoff. Deshalb werden bei Braunkohlenbriketts und Holzbrennstoffen für die Anteile der Partikelfraktionen PM_x jeweils **Mittelwerte für die Brennstoffe** aus den Angaben der Tabelle 6.1 gebildet. Bei Steinkohlenbrennstoffen liegen für die Bewertung eines Brennstoffeinflusses zu wenige Messwerte vor. In **Tabelle 6.2** sind die mittleren Anteile der Partikelfraktionen für die einzelnen Brennstoffe zusammengefasst dargestellt. Diese Angaben werden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x herangezogen.

Tabelle 6.2: Gerundete Mittelwerte der Partikelfraktionen PM_x für die verschiedenen Brennstoffe bei Einzelfeuerstätten im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher

Bauart der Feuerung	Brennstoff	Anteil der Fraktion in %		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Dauerbrandöfen Heizeinsätze für Kachelöfen Kamineinsätze Kaminöfen	Steinkohlen	85	90	97
	Steinkohlenbriketts	99	100	100
	Rheinische Braunkohlenbriketts	78	85	95
	Lausitzer Braunkohlenbriketts	89	93	98
	Mitteldeutsche Braunkohlenbriketts	77	85	94
	importierte Braunkohlenbriketts (nBL)	72	86	95
	naturbelassenes Holz	92	96	99
Pelletofen (Kaminofen)	Holzpellets	93	95	99

nBL neue Bundesländer

7 Literatur

1. BImSchV. 2001.
Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

Baumbach, G., Zuberbühler, U., Struschka, M., Straub, D., Hein, K.R.G. 1999.
Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen, Erschienen in der Reihe IVD-Berichte als Nr. 44. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart.

DIN 18 890 Teil 1. Entwurf 1990.
Dauerbrandöfen für feste Brennstoffe. Verfeuerung von Kohleprodukten - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 891. 1984.
Kaminöfen für feste Brennstoffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 891-A2. Entwurf 1998.
Kaminöfen für feste Brennstoffe. Änderung A2. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 892 Teil 1. 1985.
Dauerbrand-Heizeinsätze für feste Brennstoffe zur bevorzugten Verfeuerung von Kohle. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 892. Entwurf 1998.
Kachelofen-Heizeinsätze für feste Brennstoffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 895 Teil 1. 1990.
Feuerstätten für feste Brennstoffe zum Betrieb mit offenem Feuerraum (offene Kamine). Anforderungen, Aufstellung und Betrieb. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 895 Teil 2. 1990.
Feuerstätten für feste Brennstoffe zum Betrieb mit offenem Feuerraum (offene Kamine). Prüfung und Registrierung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 18 895 Teil 3. Entwurf 1994.
Feuerstätten für feste Brennstoffe zum Betrieb mit offenem Feuerraum (offene Kamine). Kaminkassetten zum Bau von oder zum nachträglichen Einbau in offene Kamine sowie Kamineinsätze und Kaminkassetten mit selbstschließenden Türen. Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 51 731. 1996.
Preßlinge aus naturbelassenem Holz. Anforderungen und Prüfung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 52 183. 1977.
Bestimmung des Feuchtegehaltes. Prüfung von Holz. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Jaasma, D.R., Champion, M.C. und Shelton, J.W. 1990.
Woodstove Smoke and CO Emissions: Comparison of Reference Methods with the VPI Sampler. J. Air Waste Manage. Assoc., Nr. 40, S. 866-871.

LAU. 1998 bis 2000.
Meßberichte über die Durchführung von Emissionsmessungen. Meßberichtsnummern: MB 01-97 vom 23.3.1998, MB 03-99 vom 23.3.1998, MB 02-99 vom 23.10.1999 und MB 01-2000 vom 12.4.2000. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), Halle.

Pfeiffer, F., Struschka, M. und Baumbach, G. 2000.
Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 14-00, Umweltbundesamt, Berlin.

Struschka, M., Straub, D., Pfeiffer, F. und Baumbach, G. 2001.
Untersuchung der Feinstaubemissionen einer Kleinfeuerungsanlage mittels Simulation der Ableitungs- und Austrittsbedingungen der Rauchgase. Erschienen in der Reihe IVD-Berichte als Nr. 46. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart.

Hartmann, H.; Madeker, U. und Launhardt, T. 1995.
Untersuchungen zu Struktur und Umfang des Absatzes von Biomassefeuerungsanlagen in Deutschland. Hrsg: Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk (C.A.R.M.E.N.) im Selbstverlag, Rimpar.

Teil II: Heizölkessel

Die Bearbeitung von Teil II erfolgte durch:



Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

der Universität Stuttgart

(Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. K.R.G. Hein)

und

Ingenieurbüro Dr. Struschka, Weissach

Michael Struschka

Anja Dreiseidler

Daniel Dreizler

Günter Baumbach

IVD, Pfaffenwaldring 23, D-70569 Stuttgart

Tel. 0711-685-3487, Fax 0711-685-3491

Internet: http://www.ivd.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

Seite:

1 Einleitung 152

2 Emissionsverhalten von Ölfeuerungen 153

3 Ausgangssituation 156

4 Messungen an Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern 160

4.1 Ergebnis von Voruntersuchungen 160

4.2 Untersuchungsprogramm 166

4.3 Versuchsaufbau und Messtechnik 167

4.4 Beschreibung der untersuchten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern 173

4.5 Angaben zu den eingesetzten Heizölqualitäten 174

4.6 Versuchsauswertung 175

5 Untersuchungsergebnisse 177

5.1 Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner 177

5.2 Stahl-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner 180

5.3 Guss- und Stahl-Heizkessel im Vergleich 188

5.4 Ergebnisse der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse 192

6 Zusammengefasste Ergebnisse 193

7 Literatur 196

8 Fotoanhang 198

1 Einleitung

Das Emissionsverhalten von Ölfeuerungen ist u.a. abhängig von der Zusammensetzung des eingesetzten Brennstoffs (z.B. Schwefel- und Stickstoffgehalt), von der Bauart der Feuerungsanlage, deren technischem Stand, dem Leistungsbereich und der Betriebsweise. Ausserdem wirkt sich der Wartungs- und technische Zustand der installierten Anlagen wesentlich auf das Emissionsverhalten der Geräte in der Praxis aus. Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen und geeignete Maßnahmen zur Emissionsminderung untersucht. Eine der Hauptquellen für Feinstaub im Bereich der stationären Anlagen sind nach vorläufigen Schätzungen mit festen und flüssigen Brennstoffen betriebene Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher.

Bei Einsatz von flüssigen Brennstoffen ist im Zuge der anstehenden Reduzierung des Schwefelgehaltes im leichten Heizöl durch die Umsetzung der europäischen Richtlinie 1999/32/EG vom 26. April 1999 und der damit verbundenen Novelle der 3. BImSchV der Einfluss des Schwefelgehaltes auf das Emissionsverhalten der Feuerungsanlagen und insbesondere auf die Höhe der Feinstaubemissionen von großem Interesse. Zuverlässige Daten über die Größenverteilung der Partikel, das Emissionsaufkommen und Minderungspotential an Partikeln aus diesen Feuerungsanlagen liegen bisher nicht oder nur vereinzelt vor.

Deshalb sollen das Emissionsverhalten und die Partikelemissionen von Ölfeuerungen beim Einsatz unterschiedlicher leichter Heizöle auf dem Prüfstand untersucht werden. Die Messungen sollen an einem modernen und einem älteren Heizkessel mit Ölgebläsebrenner durchgeführt werden. Eingesetzt werden sollen Heizöle mit insgesamt vier unterschiedlichen Schwefelgehalten (marktüblicher Schwefelgehalt und drei Heizöle mit reduziertem Schwefelgehalt). Da der Heizölhandel als Zusatzgeschäft intensiv den Verkauf von Additiven zur Verbrennungsverbesserung (z.B. Additive mit metallorganischen Verbindungen) bei der Heizölauslieferung fördert, soll zusätzlich die Auswirkung dieser Zusätze auf die Partikelemission untersucht werden. Die Messungen sollen den Einfluss des Schwefelgehaltes und des Additivs auf die Partikelemissionen von Feuerungen für leichtes Heizöl aufzeigen.

Die auf Filtersubstraten aus dem Abgasstrom abgeschiedenen Partikel sollen exemplarisch mittels Röntgen-Fluoreszenz-Analyse analysiert werden. Hierbei sollen wichtige Elemente (z.B. Eisen, Nickel, Chrom, Schwefel) identifiziert werden. Diese Analysen sollen einerseits Aufschluss über die elementaren Hauptbestandteile der emittierten Partikel geben und andererseits eine Bewertung, z.B. hinsichtlich metallischer Inhaltsstoffe, ermöglichen.

2 Emissionsverhalten von Ölfeuerungen

Ölfeuerungen werden bei Haushalten und Kleinverbrauchern zum überwiegenden Teil zur Bereitstellung von Raumwärme und zur Erzeugung von Warmwasser eingesetzt. Der Energiebedarf für die Raumwärmeerzeugung und damit die notwendige Leistungsabgabe der Heizgeräte hängt vom Heizwärmebedarf der Gebäude, vom Nutzerverhalten und von der Effizienz des Heizsystems ab. Komplexe Regelungen und Steuerungen moderner Heizungsanlagen versuchen, diesen Anforderungen weitgehend Rechnung zu tragen, wobei die Leistungsanpassung bei Ölfeuerungen kleinerer Leistung in Form eines Ein-Aus-Betriebes der Brenner mit entsprechend langen Brennerlauf- und -stillstandszeiten erfolgt. Bei größeren Anlagenleistungen werden zweistufige oder modulierende Ölgebläsebrenner eingesetzt, wodurch sich die Anzahl der Startvorgänge reduzieren lässt.

Von den Ölfeuerungsherstellern wurden seit der Markteinführung dieser Geräte große Anstrengungen zur Entwicklung schadstoffarmer Brennersysteme unternommen. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag zuerst auf einer Reduzierung der Emissionen unvollständiger Verbrennung, und damit der Rußzahl, bei gleichzeitiger Erhöhung der Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Anlagen. In den letzten Jahren wurde eine Minderung der NO_x-Emissionen angestrebt, ohne dabei höhere CO-und VOC-Emissionen zu verursachen. Entsprechend den gültigen Anforderungen in den einschlägigen Normen und Richtlinien für die Baumusterprüfverfahren von Ölfeuerungen richtete sich das Hauptaugenmerk dabei auf eine optimale Einstellung der Geräte im stationären Dauerbetrieb, bei gleichzeitig sicherem Startverhalten. Aber auch das Emissionsverhalten der Geräte während der Start- und Stoppvorgänge findet Beachtung, da für Ölgebläsebrenner ebenfalls Anforderungen bezüglich der VOC-Emission während der Start-Phase (z.B. im Umweltzeichen RAL UZ 9 und RAL UZ 46) festgelegt sind.

Aktuelle Entwicklungen zielen z.B. darauf ab, die Brennwerttechnik auch für leichtes Heizöl marktfähig zu machen, die Eignung von Heizöl EL für den Einsatz in Brennstoffzellen zu untersuchen oder die Oberflächenverbrennung für eine stickoxidarme und geräuscharme Heizölverbrennung technisch umzusetzen. Gelänge dies, würde der Geräteindustrie ermöglicht werden, andere Bauformen von Heizkesseln zu entwickeln, die wesentlich kompakter und platzsparender sind als derzeit übliche Geräte (IWO, 2000).

In **Tabelle 2.1** sind Emissionsfaktoren für CO, VOC, CH_4 und Partikel sowie für NO_x für Ölfeuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher aufgeführt. Die Emissionsfaktoren gelten für den Anlagenbestand an Ölfeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV in Deutschland (Pfeiffer et al., 2000). Die Emissionsfaktoren für Produkte unvollständiger Verbrennung sind für Ölfeuerungen, vor allem im Vergleich zu Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, relativ niedrig und zeigen, wenn auch aufgrund des Bestandes an älteren Geräten in abgeschwächter Form, den hohen Entwicklungsstand dieser Verbrennungstechnik.

Tabelle 2.1: Emissionsfaktoren für Ölfeuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Geltungsbereich der 1. BImSchV (nach Pfeiffer et al., 2000)

Bereich	Emissionsfaktoren in kg/TJ				
	CO	VOC (als C)	CH_4	Partikel	NO_x (als NO_2)
Haushalte	25	1,3	0,06	1,6	46
Kleinverbraucher	15	2,6	0,02	1,7	46

Dies wird durch aktuelle Untersuchungen an kleinen Ölfeuerungen bestätigt, die sich unter stationären Bedingungen alle durch sehr geringe Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung auszeichnen. Im praxisüblichen Ein-Aus-Betrieb der Geräte werden allerdings bauartbedingte Unterschiede deutlich, die zu einer größeren Bandbreite der Mehremissionen beim Brennerstart und der Emissionen beim Brennerstopp für die Komponenten CO und VOC führen. Zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von am Markt befindlichen Gerätetechnologien ist eine praxisnahe und quantitative Ermittlung von Emissionskonzentrationen während aller Betriebsphasen der Heizgeräte notwendig. Die Erfassung der Emissionen während instationärer Betriebszustände stellt allerdings hohe Anforderungen an die eingesetzten Messverfahren. Deshalb wurden diese Betriebszustände bisher bei der Bewertung der Ölfeuerungen nur teilweise und bei der Ermittlung von Emissionsfaktoren nicht herangezogen (Struschka et al., 2000).

Im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung wurde ein Messverfahren zur Bestimmung gasförmiger Emissionen aus instationären Betriebszuständen entwickelt. Grundlage dieses Messverfahrens bildet die Verknüpfung von gemessenen Emissionskonzentrationen und hierzu zeitgleich ermitteltem Abgasvolumenstrom. In **Bild 2.1** sind beispielhaft die Verläufe der CO_2- und CO-Konzentrationen im Abgas eines Heizkessels mit Ölgebläsebrenner beim Ein-Aus-Betrieb dargestellt (Struschka et al., 2000).

Nach einer kurzen Vorbelüftungszeit erfolgt die Brennstoffzufuhr und der Ölnebel wird gezündet. Während des Zündvorganges sind die Verbrennungsbedingungen (z.B. Strömungs- und Druckverhältnisse, Temperatur- und Konzentrationsverteilung) in der Flamme noch nicht optimal ausgebildet. Hierdurch werden erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung, stellvertretend ist die CO-Konzentration dargestellt, freigesetzt. Nach kurzer Brenndauer und zunehmender Stabilisierung der Verbrennung sowie Zunahme der Temperaturen in unmittelbarer Umgebung der Flamme nimmt die CO-Konzentration ab und erreicht nach einiger Zeit die geringen Konzentrationen des (quasi-) stationären Dauerbetriebs. Beim Brennerstopp wird ebenfalls ein Anstieg der CO-Konzentration gemessen. Aufgrund unterschiedlich hoher Abgasvolumenströme kann aus dem Verlauf der CO-Konzentration nicht unmittelbar auf die Emissionsfrachten geschlossen werden.

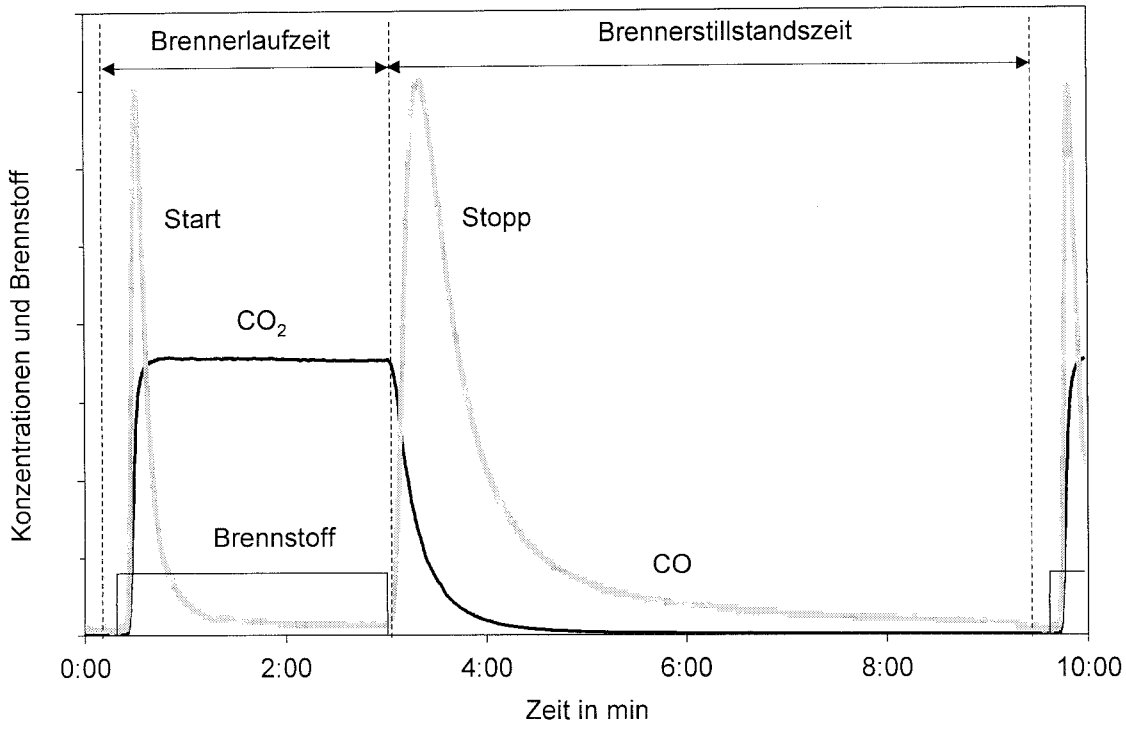


Bild 2.1: Verlauf der CO_2- und CO-Emissionen während eines Brennerzykluses im Ein-Aus-Betrieb am Beispiel eines Heizkessels mit Ölgebläsebrenner (nach Struschka et al., 2000)

Die Gesamtemission der Ölgeräte hängt von der Höhe der Mehremissionen beim Start, den quasistationären Emissionen, den Emissionen des Stoppvorganges und von der Anzahl der Start- und Stoppvorgänge ab. Die Starthäufigkeit der Geräte und die Höhe der Mehremissionen beim Brennerstart sind von der Bauart der Feuerung und deren Auslastungsgrad abhängig. In **Tabelle 2.2** sind für 8 Ölfeuerungen die CO- und VOC-Gesamtemissionen für einen mittleren Auslastungsgrad aufgelistet. Hierbei wurden die Gesamtemissionen, bezogen auf eine Kilowattstunde eingesetzt Energie, für den Ein-Aus-Betrieb berechnet. Als Vergleich hierzu wurde, unter der Annahme eines gleichen Energieeinsatzes, die Emission berechnet, die sich im Dauerbetrieb der Geräte ergeben würde (Struschka et al., 2000).

Bei den aufgeführten Ölfeuerungen und dem dargestellten Auslastungsgrad liegen die CO- bzw. VOC-Gesamtemissionen für den Ein-Aus-Betrieb im Bereich von 3,9 bis 30,3 mg/kWh bzw. 1,8 bis 30,6 mgC/kWh. Die berechneten Emissionen für den quasistationären Dauerbetrieb liegen niedriger. In die Differenz zwischen den Gesamtemissionen und den Emissionen des Dauerbetriebes gehen sowohl die Mehremissionen des Brennerstarts, die Emissionen des Stoppvorganges und die Anzahl der Start- und Stopp-Vorgänge ein.

Tabelle 2.2: CO- und VOC-Gesamtemissionen für 8 Ölfeuerungen beim Ein-Aus-Betrieb sowie beim quasistationären Dauerbetrieb (nach Struschka et al., 2000)

Öl-feuerung	Auslastungs-grad in %	Gesamtemission beim Ein-Aus-Betrieb in mg/kWh [1]		Emission beim quasistationären Dauerbetrieb in mg/kWh [2]	
		CO	VOC (als C)	CO	VOC (als C)
1	39,9	5,5	3,9	0,6	0,3
2	35,8	3,9	2,1	0,6	0,5
3	44,9	6,5	1,8	0,3	0,6
4	38,5	5,0	3,0	0,2	0,8
5	46,5	30,3	4,4	2,8	1,1
6	41,1	20,4	30,6	13,6	4,1
7	41,9	27,1	5,1	14,8	1,0
8	66,6	15,0	5,3	13,2	1,4

[1] Gesamtemission berechnet aus: Höhe der Mehremissionen beim Brennerstart, quasistationären Emissionen und Emissionen des Stoppvorganges mit der Anzahl der Start- und Stoppvorgänge und der Dauer des quasistationären Betriebes für die Verfeuerung von 1 kWh Brennstoff

[2] Emission berechnet aus: quasistationären Emissionen und der Dauer des quasistationären Betriebes für die Verfeuerung von 1 kWh Brennstoff. Die berechnete Emission ist eine reine Rechengröße und soll lediglich den Einfluss des Ein-Aus-Betriebes auf das Emissionsverhalten der Geräte verdeutlichen

3 Ausgangssituation

Über die Partikelemissionen von Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern existieren nur wenige und meist ältere Untersuchungen (z.B. Franzen (1981), eine Zusammenstellung findet sich in Baumgärtner, 1993). Vielfach sind diese Untersuchungen aufgrund der Weiterentwicklung der Brennertechnik, veränderter Ölqualitäten (alte Untersuchungen: höhere Schwefelgehalte und geringere Anteile von Crackprodukten) und unterschiedlichen methodischen Vorgehensweisen, da auch andere Fragestellungen im Vordergrund standen, überholt. Diese Untersuchungen und auch neuere Untersuchungen, bei denen die Partikelanzahlverteilungen im Abgas dieser Feuerungen gemessen wurden, können nicht zur Ableitung von Emissionsfaktoren für Partikel des derzeitigen Anlagenbestands herangezogen werden.

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist die bereits zitierte Arbeit von Baumgärtner (1993), in der u.a. Feldmessungen an 25 installierten Ölfeuerungen durchgeführt wurden. Hierbei wurden Partikelkonzentrationen im Bereich von ca. 2 bis 16 mg/m^3 (bei 3 Vol% O_2) und Rußzahlen von 0,0 bis 5,3 ermittelt. In dieser Arbeit wurde auch die Zusammensetzung der emittierten Partikel bezüglich den Gehalten an Kohlenstoff, löslichen Kohlenwasserstoffen, ausgewählten polyzyklischen Aromaten und bestimmten Metallen untersucht. Hierzu mussten, bis auf die Bestimmung der polyzyklischen Aromaten, eigene Analysenverfahren entwickelt werden. Bedeutende Anteile an der insgesamt emittierten Partikelmasse haben Kohlenstoff (elementarer Kohlenstoff (Ruß) und Kohlenstoff aus organischen Verbindungen), Schwefel (als Hauptanteil werden Sulfate vermutet) und metallische Inhaltsstoffe. Hierbei wurden Mg, Fe, Al und Na in höheren Konzentrationen nachgewiesen.

Aktuelle Untersuchungsergebnisse der Partikelanzahlverteilung liegen für moderne und auch ältere Heizkessel mit Ölgebläsebrennern vor (z.B. Mohr et al., 2000). In dieser Arbeit wurden blau- bzw. gelbbrennende Ölbrenner im Wärmeleistungsbereich von 17 bis 43 kW und Baujahren von 1987 bis 1998 untersucht. Neben dem Einfluss des Luftüberschusses auf die Partikelanzahlverteilung wurden auch Heizöle mit unterschiedlichen Schwefelgehalten eingesetzt. Unabhängig vom eingestellten Luftüberschuss wurden bei einem blaubrennenden Ölbrenner mit schwefelreduziertem Heizöl (Schwefelgehalt = 0,042 Massen-%) eine geringere Partikelanzahl gegenüber schweizerischem handelsüblichen Heizöl (Schwefelgehalt = 0,164 Massen-%) festgestellt. Der für Ölfeuerungen charakteristische Verlauf der Partikelanzahlverteilung in Abhängigkeit der Partikeldurchmesser (hier: elektrischer Mobilitätsdurchmesser) wurde allerdings durch den Schwefelgehalt des Brennstoffes nicht verändert. Nach derzeitigem Kenntnisstand können Partikelanzahlverteilungen nicht zur Ermittlung von Emissionsfaktoren herangezogen werden, da die Umrechnung der gemessenen größenabhängigen Partikelanzahl auf die Partikelmasse unklar ist.

Schwefel, als unerwünschter Brennstoffbestandteil, wird bei der Verbrennung mit dem Luftsauerstoff zu SO_2 oxidiert. Dieses Schwefeldioxid reagiert in der Flamme oder auf dem Heizgasweg in geringem Maße weiter zu Schwefeltrioxid (SO_3). Die SO_3-Bildung in Feuerungsanlagen ist im wesentlichen vom Schwefelgehalt des Brennstoffes, von der Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Flamme und im Feuerraum, von der Verweilzeit in den jeweiligen Bereichen, von der Bauform und Betriebsweise der Feuerung und von der Anwesenheit katalytisch wirkender Substanzen oder Additiven abhängig. Außerdem sind Mechanismen bekannt, die in nachgeschalteten Abgasreinigungseinrichtungen, z.B. in High-Dust-DeNOx-Anlagen oder in Elektrofiltern, zu einer weiteren SO_3-Bildung führen. Bei Feuerungsanlagen liegen typische SO_3-Bildungsraten (d.h. Anteil des SO_2 welches zu SO_3 oxidiert) in der Größenordnung von < 1 bis maximal 5 % (z.B. Struschka et al. (1986) und Schmidt, 1987).

Die Umsätze von nicht katalytischen Reaktionen tragen erst ab Temperaturen von oberhalb 900 °C wesentlich zur SO_3-Bildung bei. Bei Anwesenheit katalytisch wirkender Substanzen wird bereits im Temperaturbereich von 400 – 900 °C eine deutliche SO_3-Bildung möglich. Ob katalytische oder nicht katalytische Bildungsreaktionen den Hauptanteil zur SO_3-Bildung beitragen, hängt vor allem von Brennstoffbestandteilen (z.B. Metallgehalte) und der Feuerungsanlage ab. So wurde z.B. bei Schwerölfeuerungen nachgewiesen, dass der Anteil der katalytischen SO_3-Bildung bis 80 % betragen kann (Struschka et al. (1986) und Schmidt, 1987).

Mit dem meistens im Verbrennungsgas in großem Überschuss vorhandenen Wasserdampf bildet SO_3 ab einer Temperatur von ca. 600 °C dampfförmige Schwefelsäure. Diese Umwandlung von SO_3 in H_2SO_4 ist stark temperaturabhängig und bei 200 °C nahezu abgeschlossen. Die kondensierbaren Bestandteil im Abgas sind somit H_2O und H_2SO_4, die Löslichkeit anderer Abgaskomponenten (z.B. CO_2, SO_2) in Wasser ist infolge kleiner Partialdrücke gering und kann meist vernachlässigt werden. Für die Taupunktfestlegung ist somit das Zweistoffsystem H_2O und H_2SO_4 und damit die Anteile der beiden Komponenten maßgebend.

Der Säuretaupunkt dieses H_2O-H_2SO_4-Gemisches, der durch den Partialdruck der Schwefelsäure und der davon abhängigen Sättigungstemperatur bestimmt wird, liegt wesentlich höher als der des reinen Wasserdampfes. Bei Unterschreitung des Säuretaupunktes schlägt sich die gasförmige Schwefelsäure nieder und bildet ein Kondensat mit sehr hohem H_2SO_4-Anteil (Größenordnung: 80 Massen-%). Bei weiterer Abkühlung wird diese hochkonzentrierte Schwefelsäure durch kondensierenden Wasserdampf zunehmend verdünnt. Bis zu etwa 40 Massen-% H_2SO_4 nimmt die Aggressivität der Schwefelsäurelösung aufgrund ansteigender Dissoziierung zu und führt zu einem ersten Korrosionsmaximum, welches die Tieftemperaturkorrosion verursacht (z.B. Struschka et al. (1986) und Schmidt, 1987). Für Heizöl EL mit marktüblichem Schwefelgehalt (< 0,16 Massen-%) und bei üblicher Brennereinstellung liegt der Säuretaupunkt bei etwa 110 °C und der Wasserdampftaupunkt bei ca. 50 °C.

Untersuchungen zum Säuertaupunkt und zur SO_3- (bzw. H_2SO_4-) Konzentration im Abgas von Feuerungen für Heizöl EL liegen nur vereinzelt vor. Eine Übersicht über mögliche Säuretaupunkt- und SO_3-Messverfahren ist z.B. in Struschka et al. (1986), Schmidt, (1987) und Briel (1995) enthalten. Eine der wohl umfangsreichsten Untersuchungen zu Schwefeltrioxid-Konzentrationen im Abgas von Heizkesseln wurde von Koebel et al. (1987) durchgeführt. In dieser Arbeit wurden an 29 in der Schweiz installierten Anlagen im Leistungsbereich von 30 bis 1.160 kW SO_3-Messungen durchgeführt. Weitere Messgrößen waren die SO_2- und CO_2-Konzentration sowie die Abgastemperatur. In **Bild 3.1** sind die gemessenen SO_2- und SO_3-Konzentrationen dieser Anlagen sowie die auf die gemessene SO_2-Konzentration bezogene SO_3-Bildungsrate über der eingestellten Brennerleistung dargestellt.

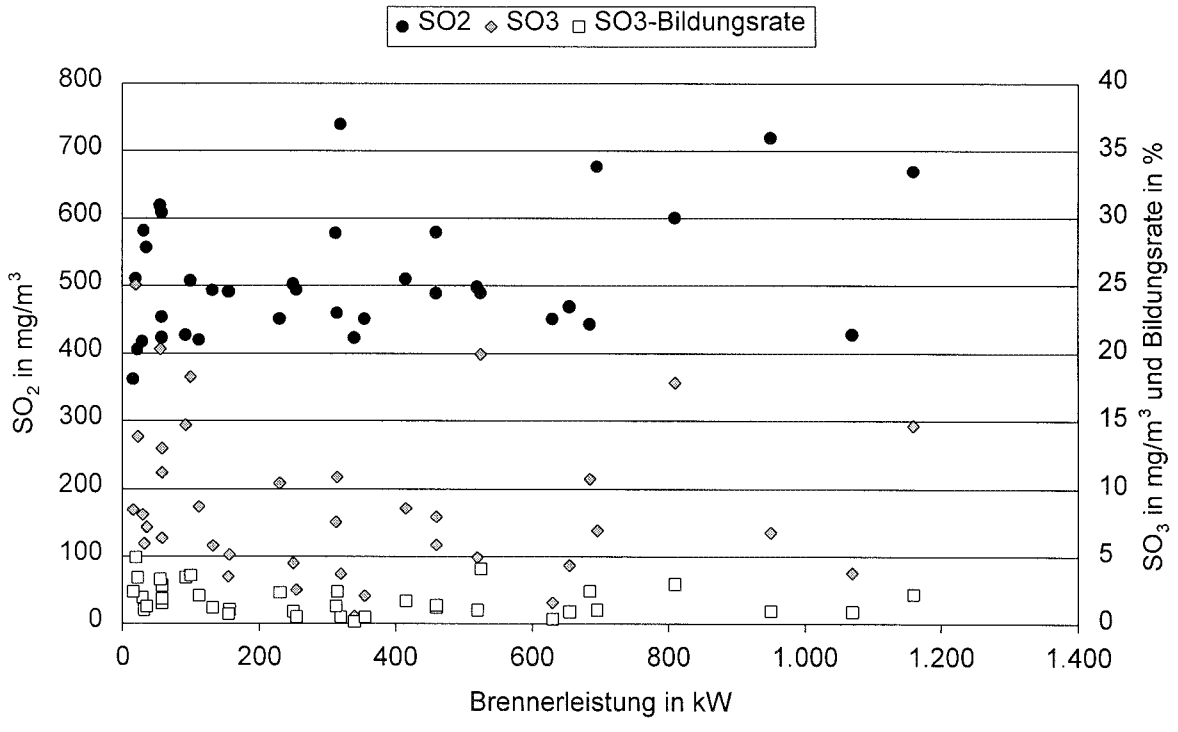


Bild 3.1: SO_2- und SO_3-Konzentrationen sowie SO_3-Bildungsrate über der Brennerleistung für 28 installierte Heizkessel mit Ölgebläsebrennern für Heizöl EL (nach Koebel et al. (1987) und eigenen Berechnungen)

Bei Schwefelgehalten der verfeuerten Heizöle EL von etwa 0,3 bis 0,5 Massen-% wurden SO_2-Konzentrationen im Abgas von rund 360 bis 740 mg/m^3 (bezogen auf 3 Vol% O_2) gemessen. Die hierbei ermittelten SO_3-Konzentrationen lagen im Bereich von etwa 0,6 bis 25,1 mg/m^3 (ebenfalls bezogen auf 3 Vol% O_2). Die SO_3-Bildungsrate, als Verhältnis der jeweiligen SO_3- und SO_2-Konzentration berechnet, liegt zwischen rund 0,1 und 5 %. Eindeutige Zusammenhänge zwischen den dargestellten Größen lassen sich nicht ablesen. So ist z.B. weder ein Anstieg der SO_3-Konzentration mit zunehmender SO_2-Konzentration ersichtlich, was eigentlich zu erwarten wäre, noch hängt die SO_3-Bildungsrate von der SO_2-Konzentration, und damit vom Schwefelgehalt des Heizöls, ab.

Bei der Betrachtung einzelner Anlagen lassen sich dennoch einige Abhängigkeiten erkennen. So nimmt bei modulierenden oder zweistufigen Anlagen die SO_3-Konzentration im Teillastbetrieb ab. Bei einigen Anlagen wurde auch der Einfluss von Kesselverschmutzungen untersucht. Zu diesem Zweck wurden einige Kessel nach einer ersten SO_3-Messung nasschemisch gereinigt. Nach dieser Reinigung nahmen die SO_3-Konzentrationen in der Größenordnung von 40 bis 80 % ab.

Die Feinstaubbelastung der Außenluft setzt sich aus direkt emittierten Partikeln (primäre Partikel) und aus sekundär gebildeten Anteilen zusammen. Diese sekundären Feinstäube entstehen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen durch chemische Umwandlung in der Atmosphäre. Primäre Partikel können definiert werden als Partikel die direkt von der Emissionsquelle in Partikelform emittiert werden und solche Stoffe, die unmittelbar nach Verlassen der Emissionsquelle (z.B. in unmittelbarer Umgebung des Schornsteins) als Partikel vorliegen. Somit können sich die Partikelemissionen einer Emissionsquelle aus einem filterbaren und einem kondensierbaren Anteil zusammensetzen (z.B. Hüglin (2000) und Corio et al., 2000).

Dies ist bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und ungünstigen Verbrennungsbedingungen der Fall, deren Abgas organische Verbindungen enthält, welche bei Umgebungstemperatur kondensieren und dann in flüssiger oder fester Form vorliegen. Deshalb erfolgte bei den Einzelfeuerstätten (siehe Teil I der Messberichte) die Partikelprobenahme auch im verdünnten und abgekühlten Abgas. Somit können die im heißen Abgas aus filter- und kondensierbaren Anteile bestehenden Partikel im verdünnten Abgas gemeinsam in Form filterbarer Partikel abgeschieden werden.

Ebenso ist bei Öl- oder Gasfeuerungen zwischen filterbaren und kondensierbaren Anteilen an der Partikelemission zu unterscheiden, wenn z.B. Schwefelverbindungen im Brennstoff enthalten sind. In diesem Zusammenhang sei die VDI-Richtlinie 3491 (1980) erwähnt, in der Partikel folgendermaßen charakterisiert werden: „Eine Partikel einer Dispersion ist jede nicht gasförmige zusammenhängende Massenanhäufung, der ein definiertes Volumen und eine Grenzfläche zugeordnet werden kann." Somit sind unter dem Begriff Partikel sowohl Feststoffpartikel als auch flüssige Tröpfchen oder Mischformen hiervon zu verstehen. Eine Zusammenstellung von Emissionsfaktoren für die Fraktion PM_{10} und einer Differenzierung zwischen filterbaren und kondensierbaren Anteilen ist z.B. in Corio et al. (2000) enthalten.

4 Messungen an Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern

Bei diesen Feuerungen sind sehr gute Verbrennungsbedingungen vorhanden und damit sind auch nur sehr geringe VOC-Konzentration im Abgas nachweisbar. Organische Verbindungen, die bei niedrigen Abgastemperaturen oder im Bereich der Schornsteinmündung kondensieren, sind somit bei diesen Anlagen nicht zu erwarten. Aufgrund der guten Verbrennungsbedingungen ist auch die Partikelkonzentration im Abgas gering. Eine Verdünnung des Abgases, wie sie bei den Einzelfeuerstätten durchgeführt wurde, würde zu unvertretbar langen Probenahmezeiten führen. Aus diesen Gründen erfolgt die Probenahme zur Partikelbestimmung bei den Ölfeuerungen im **unverdünnten** Abgas. Der kondensierbare Anteil der Partikelemission in Form von SO_3 (bzw. H_2SO_4) im Abgas wird durch die Messung der H_2SO_4-Konzentration erfasst. Bei dieser Messung kann eine Fraktionierung der kondensierten Partikel nicht vorgenommen werden. Deshalb erfolgte in diesem Fall eine Berechnung der Partikelfraktionen PM_x anhand von Literaturangaben über die Größenverteilung von kondensierter Schwefelsäure in unmittelbarer Nähe einer Emissionsquelle.

Die Messungen an den Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern stellen die Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher dar. Anhand der Ergebnisse kann der Einfluss des Schwefelgehaltes im Heizöl EL und von Additiven auf die Partikelbildung aufgezeigt werden.

4.1 Ergebnis von Voruntersuchungen

Im ursprünglichen Versuchsplan des Vorhabens waren Partikelmessungen im stationären Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung und exemplarisch beim Ein-Aus-Betrieb der Feuerung vorgesehen. Zur Ermittlung der Größenverteilung der Partikel sollte, wie bei den Messungen an den anderen Feuerungsanlagen in diesem Vorhaben, der Kaskadenimpaktor vom Typ Mark III der Firma Andersen (siehe auch Tabelle 4.2 im Teil I) eingesetzt werden. Um zu klären, ob dieser Impaktor bei den geringen Partikelkonzentrationen und beim Ein-Aus-Betrieb der Ölfeuerung eingesetzt werden kann, wurden Voruntersuchungen durchgeführt.

Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Voruntersuchungen sind ausführlich in Dreizler (2001) beschrieben. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Partikelverteilungen im Abgas der Ölfeuerung mit dem Kaskadenimpaktor vom Typ Mark III der Firma Andersen weder beim Ein-Aus-Betrieb noch beim stationären Dauerbetrieb ermitteln ließen. Als für diese Messaufgabe geeignet erwies sich der 13stufige Niederdruck-Kaskadenimpaktor vom Typ LPI 20 der Firma Dekati. Die Gründe hierfür und die durchgeführten Voruntersuchungen werden in diesem Kapitel zusammengefasst aufgezeigt.

Die Messungen wurden an einem marktüblichen Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die eingesetzte Messtechnik, mit Ausnahme der nur in den Vorversuchen verwendeten Partikelmesstechnik, sind in Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Bestimmung der Größenverteilung der Partikel erfolgt beim Kaskadenimpaktor Mark III mit Filtersubstraten aus Glasfasermaterial. Beim eingesetzten Filterkopfgerät wurden Filter aus Glas- und Quarzfasern eingesetzt.

Als Brennstoff wurde handelsübliches Heizöl EL aus Beständen des Heizkraftwerkes der Universität Stuttgart und älteres Heizöl mit höherem Schwefelgehalt verwendet. Aufgrund der geringen Partikelkonzentration im Abgas von modernen Ölfeuerungen wurden die Probenahmezeiten für die Partikelmessungen im stationären Dauerbetrieb mit ca. 24 Stunden und im Ein-Aus-Betrieb mit ca. 48 Stunden festgelegt.

In **Bild 4.1** sind beispielhaft die Größenverteilungen der Partikel im Abgas der Ölfeuerung beim stationären Dauerbetrieb und beim Ein-Aus-Betrieb bei einer Kesselauslastung von ca. 40 % dargestellt.

Insgesamt fallen folgende Punkte bei diesen Ergebnissen auf:

- die Partikelemission setzt sich, entgegen den Ergebnissen aus neueren Veröffentlichungen zur Partikelanzahlverteilung im Abgas derartiger Feuerungen, siehe z.B. Mohr et al. (2000), nicht nur aus feinen Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern < 0,5 µm zusammen. Ein erheblicher Anteil der Partikelmasse die im Impaktor abgeschieden wurde, weist einen Durchmesser von > 0,5 µm auf

- die ermittelten Partikelkonzentrationen beim Dauerbetrieb entsprechen nicht den bisherigen Erfahrungen. So wurden z.B. von Baumgärtner (1993) in der bereits zitierten Untersuchung an installierten Ölfeuerungen bei Rußzahlen von 0,0 bis 5,3 Partikelkonzentrationen im Bereich von ca. 2 bis 16 mg/m^3 (bei 3 Vol% O_2) ermittelt. Bei diesen Messungen wurden Glasfaserfilter oder vergleichbares Filtermaterial verwendet.
  Beim Ein-Aus-Betrieb ergibt sich, im Vergleich zum stationären Dauerbetrieb, eine deutliche Verschiebung der Größenverteilung hin zu Partikel mit einem Durchmesser > 12,0 µm. Außerdem nimmt, entgegen den Erwartungen, die Partikelkonzentration ab.

Bei den Partikelmessungen im Ein-Aus-Betrieb des Brenners wurden der Impaktor und das Planfilterkopfgerät während der gesamten Probenahmezeit von 48 Stunden mit abgesaugtem Gas beaufschlagt. Während der Brennerlaufzeiten wurde somit partikelbeladenes Abgas und während der Brennerstillstandszeiten gereinigte partikelfreie Umgebungsluft über die Filter geleitet. Bei der Auswertung der Partikelkonzentration und der Größenverteilung der Partikel wurden die abgesaugten Volumina der Brennerstillstandszeiten berücksichtigt, so dass sich die Ergebnisse nur auf Abgasvolumina beziehen.

Ein An- und Abschalten der Partikelprobenahme entsprechend der Taktfrequenz des Brenners ist nicht ohne weiteres zu realisieren, da das Hochlaufen der Gaspumpen und die Ausbildung eines stabilen Strömungsprofils im Impaktor mehr Zeit in Anspruch nimmt als der eigentliche Zündvorgang der Ölflamme. Somit wäre eine Erfassung der zu erwartenden Mehremission von Russ beim Startvorgang nicht oder nur unvollständig erfolgt.

Bei den festgelegten Randbedingungen ergaben sich für diese Versuche Brennerlaufzeiten von etwa 7 Minuten und Brennerstillstandszeiten von nicht ganz 10 Minuten.

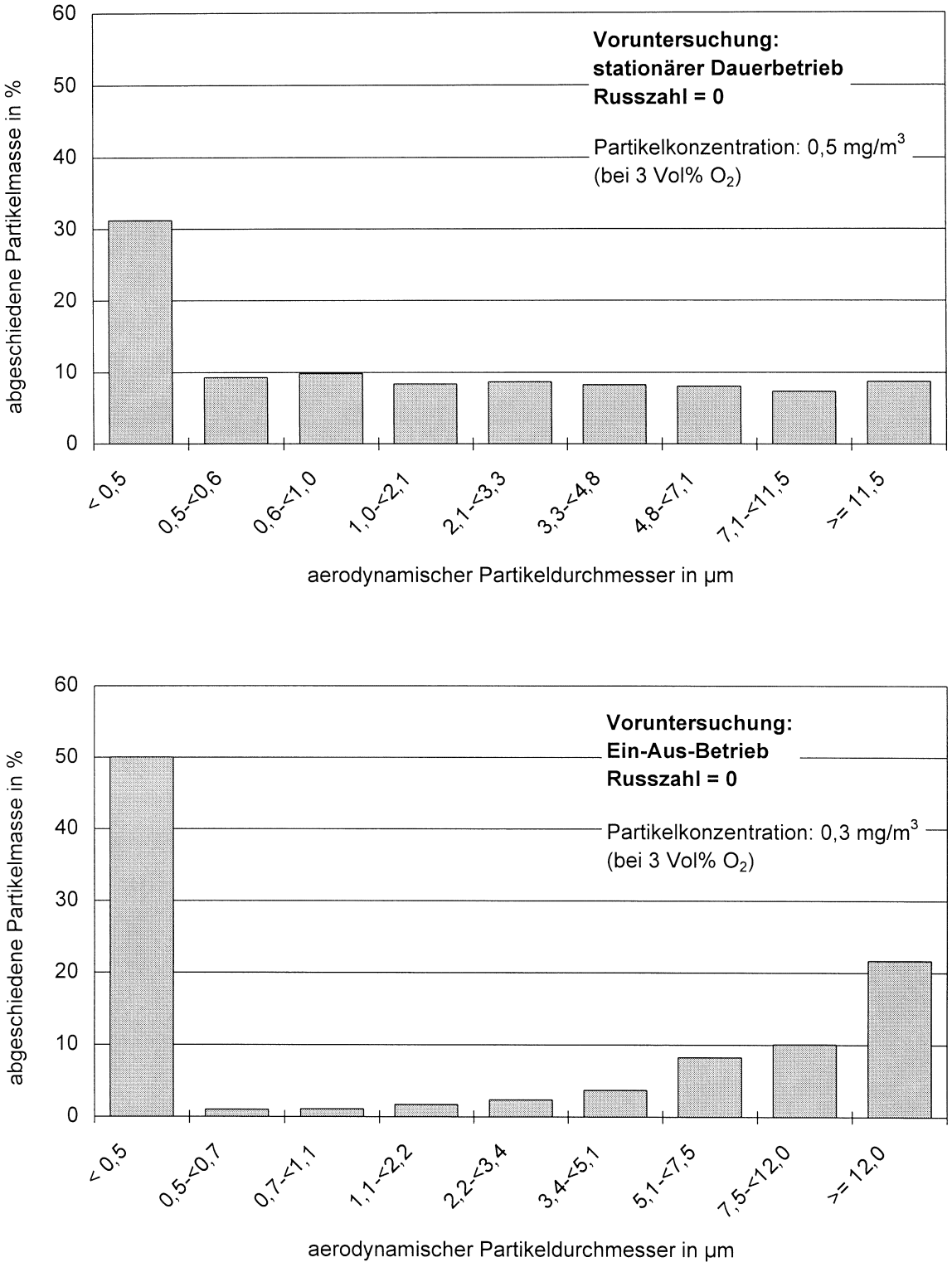


Bild 4.1: Größenverteilung der Partikel und Partikelkonzentration beim Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner für den stationären Dauerbetrieb und den Ein-Aus-Betrieb mit handelsüblichem Heizöl EL (Vorversuche mit Impaktor Mark III mit Glasfasersubstraten und Planfilterkopfgerät mit Quarzfasersubstraten)

Während der Brennerstillstandszeiten nimmt die Temperatur des im Abgasrohr eingebauten Panfilterkopfgerätes und des extern angebrachten und elektrisch auf Abgastemperatur be-

heizten Impaktors ab. Hierdurch kann beim Brennerstart zeitweise Wasserdampf in den Probenahmegeräten oder auf den Filtersubstraten kondensieren und zu Verfälschungen der Messergebnisse führen. Außerdem ändert sich nach dem Brennerstart sehr schnell die Temperatur und die Zusammensetzung des Abgases. Hierdurch ergeben sich bei jedem Startvorgang kurzzeitige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Impaktor, die nur mit hohem Aufwand durch Regelvorgänge kompensiert werden könnten.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde auf die geplanten Messungen der Partikelemissionen bei praxisüblichem Ein-Aus-Betrieb des Ölbrenners verzichtet. Mit der eingesetzten Messtechnik können bei dieser Betriebsweise der Feuerung keine zuverlässigen Ergebnisse gewonnen werden.

Um die Aussagekraft der im Dauerbetrieb gemessenen Partikelverteilung und Partikelkonzentration zu bewerten, wurden weitere Messungen durchgeführt. So wurde die Massenverteilung der einzelnen Impaktorstufen und des Endfilter mit und ohne vorgeschaltetem Planfilterkopfgerät verglichen. Wird vor dem Impaktor ein Filterkopfgerät (mit Filtersubstrat aus Glasfasern) angeordnet so ist davon auszugehen, dass keine filterbaren Partikel mehr in den Impaktor gelangen. In **Bild 4.2** ist das Ergebnis dieser Vergleichsmessungen dargestellt.

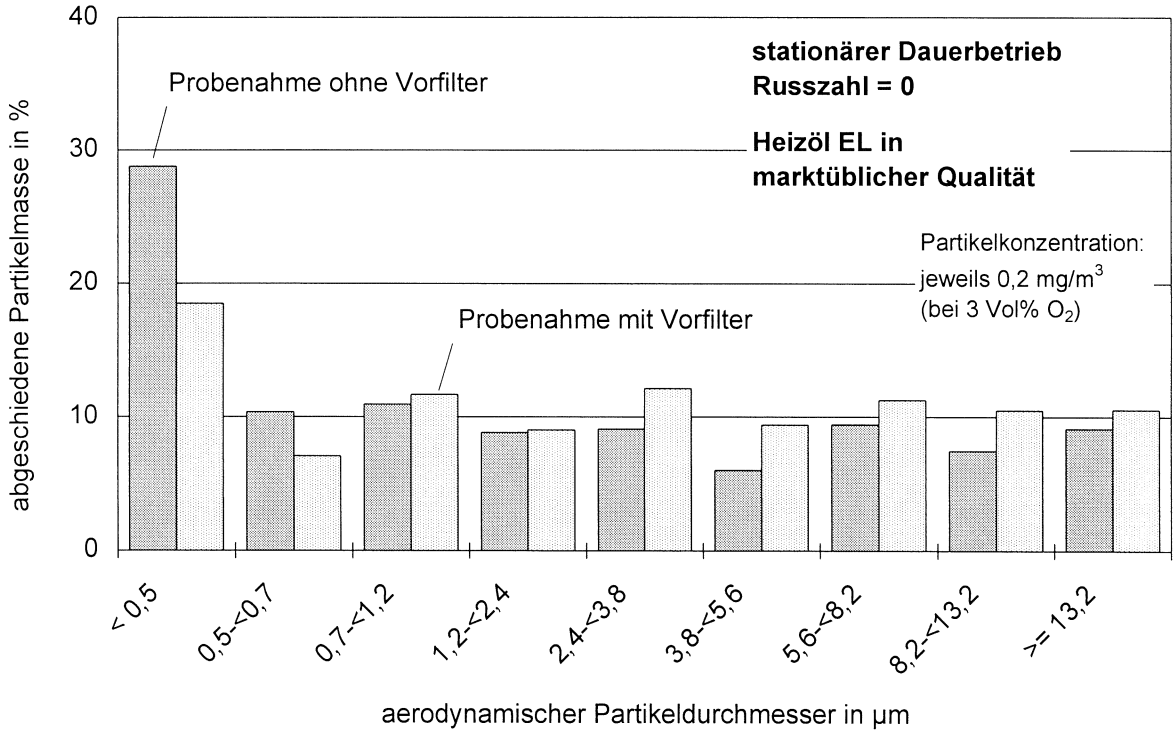


Bild 4.2: Verteilung der auf den Trennstufen und dem Endfilter des Impaktors abgeschiedenen Massen mit und ohne Vorfilter (Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner, stationären Dauerbetrieb mit handelsüblichem Heizöl EL, Planfilterkopfgerät als Vorfilter vor Impaktor installiert, Glasfasersubstrate, Partikelkonzentration mit Planfilterkopfgerät ermittelt)

Auch wenn der Impaktor durch Vorschaltung eines Planfilterkopfgerätes mit partikelfreiem Abgas beaufschlagt wird, erhält man nahezu die selbe Massenverteilung wie bei der Beprobung mit partikelbeladenem Abgas. Lediglich auf dem Endfilter des Impaktors wurden bei der Probenahme ohne Vorfilter deutlich mehr Partikel (aerodynamische Durchmesser < 0,5 µm) abgeschieden als bei der Probenahme mit Vorfilter. Insgesamt fällt eine sehr gleichmäßige Belegung der Trennstufen auf. Wird für die Versuche mit Vorfilter die abgeschiedene Masse jeweils auf die Masse des unbeladenen Filtersubstrates bezogen, so nimmt die Masse im Mittel für alle Trennstufen und den Endfilter um rund 0,22 % zu. Die auf diesen Mittelwert bezogene Standardabweichung beträgt rund 22 %. Für die meisten Versuche mit Vorfilter sind keine großen Unterschiede in der prozentualen Massenzunahme für die einzelnen Trennstufen oder den Endfilter erkennbar. Die Beladung der Filtersubstrate erfolgt somit proportional zur Filtermasse bzw. Filteroberfläche. Es ist davon auszugehen, dass eine solche proportionale Zunahme der Beladung der Filtersubstrate durch Reaktionen mit gasförmigen Bestandteilen des Abgases hervorgerufen wird. Es handelt sich dabei nicht um eine Partikelfraktionierung, sondern um unerwünschte physikalische bzw. chemische Reaktionen. Möglich ist eine Adsorption gasförmiger Abgaskomponenten auf Glasfaserfiltern, die als Artefaktbildung bezeichnet werden kann, und vor allem aus dem Bereich der Partikel-Immissionstechnik bekannt ist.

Zur Klärung der Frage, welche Abgasinhaltsstoffe für diese Artefaktbildung verantwortlich sind, wurden vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Brennstoffqualitäten durchgeführt. Hierbei wurde der Impaktor mit dem Planfilterkopfgerät als Vorfilter betrieben. Zusätzlich zum bereits verwendeten Heizöl EL in marktüblicher Qualität mit einem Schwefelgehalt im Bereich von < 0,16 Massen-% wurden Messungen mit einem älterem Heizöl EL (Schwefelgehalt etwa 0,33 Massen-%) und nahezu schwefelfreiem Rapsmethylester (Produktbezeichnung Biodiesel mit einem Schwefelgehalt < 0,001 Massen-%) durchgeführt. Bei allen Brennstoffqualitäten wurden gleiche Betriebsbedingungen und Rußzahlen von 0 eingestellt.

Bei Verwendung eines Vorfilters wurden für die beiden unterschiedlichen Heizölqualitäten nahezu identische Ergebnisse der Massenverteilungen auf den einzelnen Trennstufen des Impaktors und auf dem Endfilter erhalten. Die auf das Filterleergewicht bezogene prozentuale Massenzunahme nimmt allerdings im Mittel für alle Trennstufen und den Endfilter von rund 0,22 % für marktübliches Heizöl auf etwa 0,41 % für das alte Heizöl zu und verdoppelt sich hiermit nahezu. Bei den Versuchen mit Rapsmethylester ließ sich auf den Impaktorstufen keine Partikelzunahme mehr nachweisen. Die Massenzunahme ist somit proportional zum Schwefelgehalt des Brennstoffes, was in **Bild 4.3** dargestellt ist.

Die Messungen mit unterschiedlichen Brennstoffqualitäten zeigen, dass die Artefaktbildung vor allem vom Schwefelgehalt des Brennstoffs und damit von Schwefeloxiden im Abgas abhängt. Diese Schlussfolgerung wird durch Ergebnisse ionenchromatographischer Analysen von beprobten und unbeprobten Filtersubstraten gestützt, die eine deutliche Zunahme der Sulfatgehalte bei den belegten Filtern zeigt.

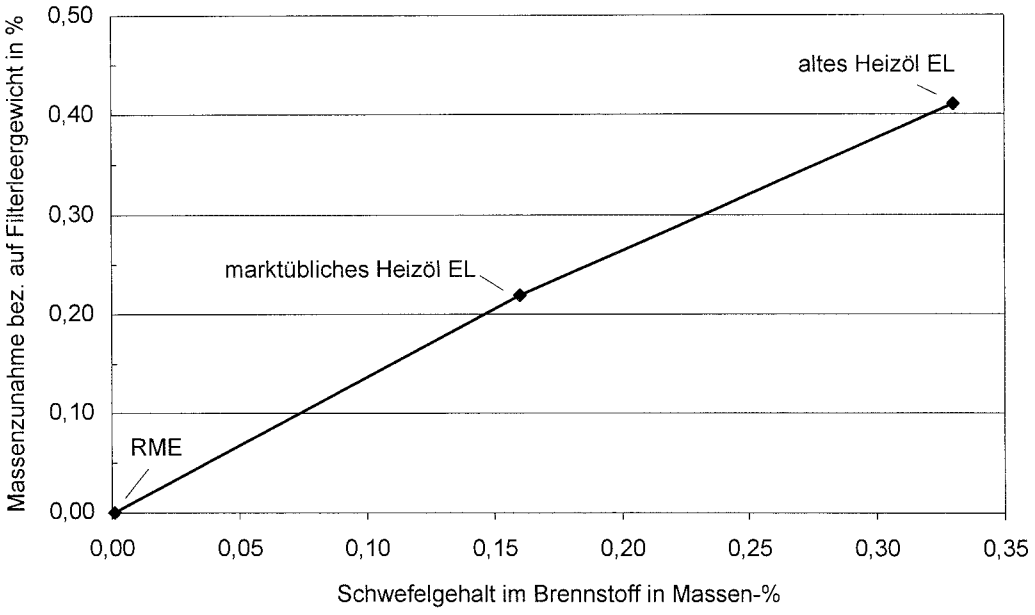


Bild 4.3: Zusammenhang zwischen Schwefelgehalt im Brennstoff und auf das Filterleergewicht bezogene Massenzunahme bei Versuchen mit Vorfilter und unterschiedlichen Ölqualitäten (Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner, stationären Dauerbetrieb, Planfilterkopfgerät als Vorfilter vor Impaktor installiert, Glasfasersubstrate)

Somit können aufgrund der ausgeprägten Artefaktbildung die Filtersubstrate aus Glasfasermaterial nicht für die Messungen an Ölfeuerungen eingesetzt werden. Filtersubstrate aus anderen Materialien sind nicht im Handel erhältlich und können auch nicht ohne ein Stanzwerkzeug selbst hergestellt werden. Somit kann der Impaktor vom Typ Mark III nicht für die Messungen an Ölfeuerungen eingesetzt werden.

Damit in diesem Vorhaben die gravimetrische Ermittlung der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei Ölfeuerungen doch noch vorgenommen werden konnte, wurde die Eignung eines 13stufigen Niederdruck-Kaskadenimpaktors (Hersteller Firma Dekati, Typ LPI 20, nach dem Berner-Prinzip), im folgenden als **LPI** (**L**ow **P**ressure **I**mpactor) bezeichnet, für diese Messaufgabe untersucht. Eine Beschreibung des LPI findet sich in Kapitel 4.3.

Mit diesem Impaktor kann eine Fraktionierung der Partikel bis zu einem aerodynamischen Durchmessern von ca. 0,03 µm durchgeführt werden. Bei bisherigen Messungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und kurzen Probenahmezeiten (ca. 1 Stunde) wurden Filtersubstraten auf Basis von Polycarbonaten erfolgreich verwendet. Bei ersten Messungen an der Ölfeuerung zeigte sich allerdings, dass diese Filtersubstrate in diesem Anwendungsfall nicht eingesetzt werden können. So traten bei der 24- bis 36stündigen Probenahmezeit vor allem am Filtersubstrat der ersten von dreizehn Trennstufen starke Verformungen und Materialzerstörungen auf, so dass eine gravimetrische Auswertung der beschädigten Substrate nicht mehr sinnvoll war. Auf den anderen Stufen zeigten sich gelbliche Verfärbungen in unterschiedlicher Intensität, die ebenfalls auf eine merkliche Artefaktbildung hindeuteten. Dies wurde durch weitere Messungen mit vorgeschaltetem Planfilterkopfgerät bestätigt.

Letztlich stellte sich im Laufe der Voruntersuchungen heraus, dass Filtermaterial aus PTFE für die Messungen an den Ölfeuerungen geeignet ist. Dieses Filtermaterial ist im eingesetzten Temperaturbereich gegenüber der im Abgas enthaltenen Schwefelsäure unempfindlich, Verformungen oder Materialbeschädigungen traten nicht auf. Auch die Artefaktbildung wird deutlich reduziert. So wurden beim LPI bei zwei Versuchen mit Vorfiltern auf den Trennstufen 2 bis 8 (bei aerodynamischen Durchmessern von 0,4 bis < 10,2 µm) sowie auf den Stufen 1 und 12 bis 13 (bei aerodynamischen Durchmessern > 10,2 und < 0,06 µm) Artefakte nachgewiesen.

Bei den Messungen mit Vorfilter ergibt sich für den LPI eine mittlere Konzentration von rund 0,01 mg/m^3, bezogen auf 3 Vol% O_2, die der Artefaktbildung zuzurechnen ist. Verglichen mit der aus den Impaktorergebnissen ohne Vorfilter berechneten mittleren Partikelkonzentration von rund 0,07 mg/m^3 für alle unter gleichen Bedingungen durchgeführten Versuche mit derselben Heizölqualität, ergibt sich ein Anteil der Artefakte von weniger als 16 %. Aufgrund des relativ geringen Anteils an Artefakten an der insgesamt im Impaktor abgeschiedenen Partikelmasse wurden die gemessenen Verteilungen der Partikelgrößen und berechneten Anteile der Partikelfraktionen PM_x ohne weitere Korrektur verwendet.

Dies gilt auch für die Messergebnisse der Partikelkonzentrationen, die mit dem Planfilterkopfgerät und Filtern aus Quarzfasermaterial durchgeführt wurden. Hier liegt der Anteil der Artefakte an der Partikelkonzentration im Mittel unter 5 %. Die mit partikelfreiem Probengas beaufschlagten Filter wiesen in der Regel sehr geringe Beladungen aus, wodurch sich eine größere Unsicherheit im Wägeergebnis als bei den mit Partikeln beladenen Filtern ergibt.

4.2 Untersuchungsprogramm

Als typischer Vertreter für die bei Haushalten und Kleinverbrauchern installierten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern wurde ein marktüblicher Guss-Heizkessel mit einem gelbbrennenden Ölgebläsebrenner und ein Altgerät (Stahl-Heizkessel mit Brennkammereinsatz und Gelbbrenner) untersucht. Hierbei wurden die Partikel- und H_2SO_4-Emissionen im stationären Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung mit verschiedenen Heizölqualitäten und bei Zugabe eines Additivs (Verbrennungsverbesserer) gemessen. In **Tabelle 4.1** sind die durchgeführten Messungen, allerdings ohne die Voruntersuchungen, an den Ölfeuerungen aufgelistet.

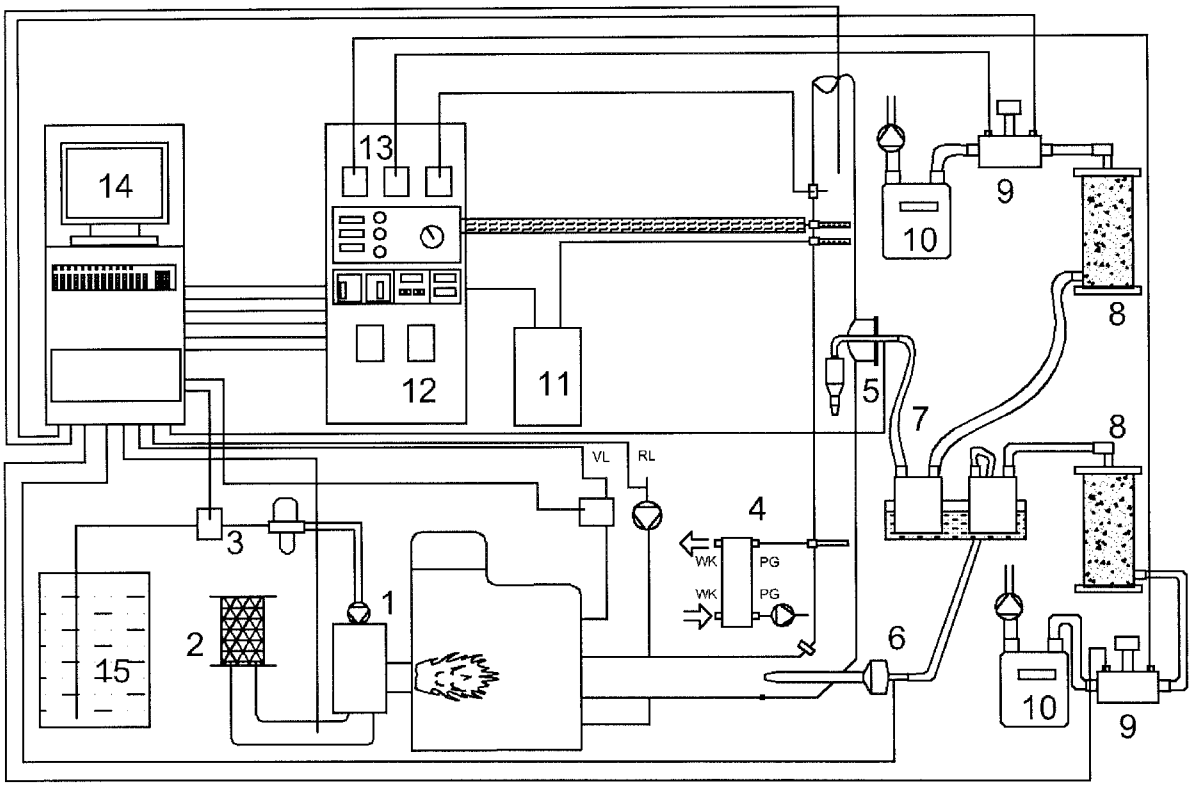
Tabelle 4.1: Versuchsmatrix der Prüfstandsmessungen bei Ölfeuerungen (Nennwärmeleistungen < 50 kW) und Partikelprobenahme im **unverdünnten** Abgas

Bauart der Feuerung	Schwefelgehalt des Heizöl EL in Massen-%	Brennereinstellung (RZ = Rußzahl)	Anzahl der Partikelmessungen bei Nennwärmeleistung mit dem	
			Planfilterkopfgerät [1]	Impaktor
Guss-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner (marktübliches Gerät)	0,14 (marktüblich)	nicht optimale Einstellung (RZ = 1)	-	1
		optimale Einstellung (RZ = 0)	4	4
	0,1	optimale Einstellung (RZ = 0)	2	
	0,05	optimale Einstellung (RZ = 0)	3	
	0,001	optimale Einstellung (RZ = 0)	3	2
Stahl-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner (Altgerät)	0,14 (marktüblich)	optimale Einstellung (RZ = 0-1)	3	1
	0,1	optimale Einstellung (RZ = 0-1)	3	1
	0,05	optimale Einstellung (RZ =0-1)	3	1
	0,001	nicht optimale Einstellung (RZ > 1 und < 3)	1	
		optimale Einstellung (RZ =0-1)	2	1
	0,14 mit Additiv (Verbrennungsverbesserer)	optimale Einstellung (RZ ~ 0) Additivdosierung: 1:2000	3	1
		optimale Einstellung (RZ ~ 0) Additivdosierung: 1:4000	2	1
		Summe	**29**	**13**

1 parallel zur Messung der Partikelkonzentration mit dem Planfilterkopfgerät wurde in der Regel die H_2SO_4- (bzw. SO_3-) Konzentration nach dem Shell-Verfahren bestimmt

4.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Bild 4.4 zeigt schematisch den eingesetzten Versuchsaufbau zur Bestimmung der Partikelkonzentration und der Größenverteilung der Partikel bei den Ölfeuerungen. Die Partikelprobenahme findet hier um unverdünnten Abgas unmittelbar nach dem Heizkessel statt.



1 Brenner/Kessel-Kombination
2 Verbrennungsluftfilter
3 Volumenzähler für Heizöl
4 Probenahme zur Bestimmung von H_2SO_4 mit PG: Probengas; WK: Wasserkreislauf
5 Planfilterkopfgerät
6 LPI (Niederdruck-Impaktor)
7 Kondensatabscheider
8 Trockentürme
9 Kontrolleinheiten für Partikelprobenahme
10 Volumenstromzähler für Probengas
11 Messgaskühler
12 Messgeräte für Gaskonzentrationen
13 Druckmessdosen
14 Messdatenerfassung
15 Brennstoff aus Fassgebinden

Bild 4.4: Versuchsaufbau (schematisch) zur Bestimmung der Partikelkonzentrationen und Partikelgrößenverteilungen von Ölfeuerungen

Der Ölbrenner saugt die Verbrennungsluft über einen Partikelfilter und eine Kanalstrecke von etwa 3 m Länge direkt aus der Außenluft an. Durch den Filter wird eine Beeinflussung der Partikelmessung durch Außenluftpartikel weitestgehend verhindert. Dies wurde durch zwei Versuche nachgewiesen, bei denen nur das Brennergebläse ohne Flamme über einem Zeitraum von 36 bzw. 88 h in Betrieb war. Der Mittelwert der Partikelkonzentrationen für diese beiden Versuche beträgt 0,007 mg/m^3 und liegt damit mindestens um eine Größenordnung unter den gemessenen Partikelkonzentrationen bei der Heizölverbrennung. Die Verbrennungslufttemperatur wird mit einem Thermoelement unmittelbar vor dem Brenner gemessen.

Die Brennstoffversorgung erfolgte aus handelsüblichen 200 l Metallfässern, da so ein einfacher Wechsel der Brennstoffqualität möglich ist. In der Ölzuführung (Einstrangsystem) zum Brenner ist ein Ölfilter mit Luftabscheidung eingebaut. Die verbrannte Ölmenge wird mit einem Volumenzähler erfasst. Dessen Ausgangssignal wird in der Messwerterfassung zur Berechnung der momentanen Brennerleistung verwendet.

Der Kessel ist über einen Mischer mit dem Kühlwassernetz des Technikums verbunden. Der Wasserumlauf im Heizkreislauf wird über eine Heizkreispumpe erzeugt. Dieser übergeordnet ist eine wesentlich größere Pumpe für den Kühlwasserkreislauf. Durch den Kühlwasserkreislauf ist eine kontinuierliche Wärmeabnahme über einen beliebigen Versuchszeitraum gewährleistet. Zur Kontrolle und Ermittlung des Heizwasser-Volumenstromes ist im Rücklauf des Kessels ein Volumenzähler installiert. Um den stationären Betrieb während des Versuchzeitraumes überwachen zu können, sind im Vor- und Rücklauf des Kessels Thermoelemente eingebaut.

Die Abgasführung wurde vom Kesselausgang bis hinter den Probenahmestellen komplett in Edelstahlrohren mit einem Durchmesser von 160 mm ausgeführt. Am Kesselausgang erfolgte ggf. eine Erweiterung vom Durchmesser des Kesselstutzens auf diesen Durchmesser. Über ein separates Abgasgebläse und eine Zugregelklappe wird ein konstanter Abgaszug auch bei unterschiedlichen Brennereinstellungen sichergestellt. Insgesamt sind in der Abgasstrecke zwei Probenahmestellen für die Partikelmessung, jeweils eine Möglichkeit zur Bestimmung der Rußzahl und der H_2SO_4-Konzentration, eine Temperaturmessstelle, zwei Sonden für die Gasprobenahme und ein Anschluss für eine Druckmessdose installiert.

Aufgrund seiner Bauweise ist der LPI nicht für einen direkten Einbau in das Abgasrohr (In-Stack-Probenahme) vorgesehen. Deshalb wurde der Impaktor mit einer geraden Entnahmesonde versehen und außerhalb des Abgasstromes aufgebaut. Der Impaktor und die Entnahmesonde waren mit elektrischen Heizungen versehen die so eingestellt wurden, dass die Temperaturen der Abgastemperatur an der Entnahmestelle entsprachen. Das Planfilterkopfgerät konnte direkt im Abgasstrom (In-Stack) angeordnet werden, eine zusätzliche Beheizung war deshalb nicht notwendig. Zur Überwachung der Partikelprobenahme waren jeweils Kontrolleinheiten zur kontinuierlichen Messung von Temperatur, Unterdruck und Volumenstrom in den Aufbau integriert. Um die Standzeiten der Trockentürme zu erhöhen, befanden sich die vorgeschalteten Kondensatabscheider in einem gekühlten Wasserbad.

Die Größenverteilung der Partikel liegt als Mittelwert über die Probenahmedauer, die beim Niederdruck-Kaskadenimpaktor (LPI) ca. 20 bis 45 h betrug, vor. Während dieses Zeitraumes wurden eine oder zwei Messungen zur Ermittlung der Partikelkonzentration mit dem Planfilterkopfgerät (VDI 2066, Blatt 7) durchgeführt. Parallel hierzu erfolgte die Probenahme zur Bestimmung der H_2SO_4-Konzentration.

Der LPI besitzt 13 Trennstufen und ermöglicht eine Trennung von Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern im Bereich von 0,03 bis >10,2 µm. Da der Impaktor keinen Endfilter besitzt, werden Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von < 0,03 µm nicht erfasst. Die zur Abscheidung von sehr kleinen Partikel notwendigen hohen Strömungsgeschwindigkeiten können im Impaktor nur durch die Absenkung des Druckes auf den letzten Trennstufen erreicht werden. Die Partikelfraktionierung erfolgt beim LPI, wie beim 8stufigen Impaktor der Firma Andersen, nach dem Strömungstrennverfahren und nachfolgender gravimetrischer Bestimmung der abgeschiedenen Partikelmasse.

Das partikelbeladene Probengas wird in Düsen in Richtung der Filtersubstrate beschleunigt. Durch die Strömungsumlenkung oberhalb der Filtersubstrate werden Partikel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und ihres aerodynamischen Durchmessers ggf. aus dem Gasstrom herausgetragen und auf den Filtern impaktiert. Aufgrund der steigenden Gasgeschwindigkeiten bei kleineren Düsendurchmessern werden von Trennstufe zu Trennstufe Partikel mit immer kleineren aerodynamischen Durchmesser klassiert.

Tabelle 4.2 zeigt typische Daten für die Trenndurchmesser und den Absolutdruck bei den einzelnen Trennstufen des LPI vom Typ LPI 20 der Firma Dekati.

Tabelle 4.2: Charakteristische Daten für den Niederdruck-Impaktor vom Typ LPI 20 der Firma Dekati (gerundete Herstellerangaben, Randbedingungen: 20 °C, 1.013 mbar)

Trennstufe	Düsenanzahl	Trenndurchmesser in µm	Absolutdruck in mbar
1	138	0,03	100
2	116	0,06	222
3	42	0,1	382
4	38	0,2	688
5	54	0,3	894
6	100	0,4	973
7	96	0,6	997
8	40	1,0	1005
9	34	1,6	1010
10	28	2,5	1012
11	6	4,0	1012
12	1	6,6	1013
13	1	10,2	1013
		Eingangsdruck	1013

Für die Auswertung der Impaktormessungen wurden die Herstellerangaben zu den Trenndurchmessern verwendet. Da die aktuellen Bedingungen bei der Probenahme von den Randbedingungen zur Berechnung dieser Trenndurchmesser abweichen, können sich hierdurch, vor allem auf den ersten und letzten Trennstufen, Unterschiede ergeben. Nach eigenen Abschätzungen sind die Unterschiede zwischen den vom Hersteller berechneten und sich aufgrund der Probenahmebedingungen ergebenden Trenndurchmessern bei Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von 0,3 bis 4,0 µm gering, so dass die Partikelfraktionen PM_x mit den angegebenen Trenndurchmessern zuverlässig berechnet werden können. Um die benötigten Druckverhältnisse zu erreichen, wird eine Vakuumpumpe mit einem minimalen Absolutdruck von 100 mbar bei einem Durchfluss von mindestens 7 m^3/h verwendet.

Bild 4.5 zeigt den Impaktor in zusammengebauten Zustand und eine Stufe in Explosionsdarstellung. Die einzelnen Stufen bestehen aus einer Düsenplatte (2) und der zugehörigen Impaktionsplatte (5), sowie dem Abstandsring (7). Zur Abdichtung der Stufen untereinander werden O-Ringe (1, 3, 6) aus Viton eingesetzt, die Betriebstemperaturen bis 200 °C ermöglichen. Die Filtersubstrate werden über Sprengringe (4) auf der Impaktionsplatte fixiert.

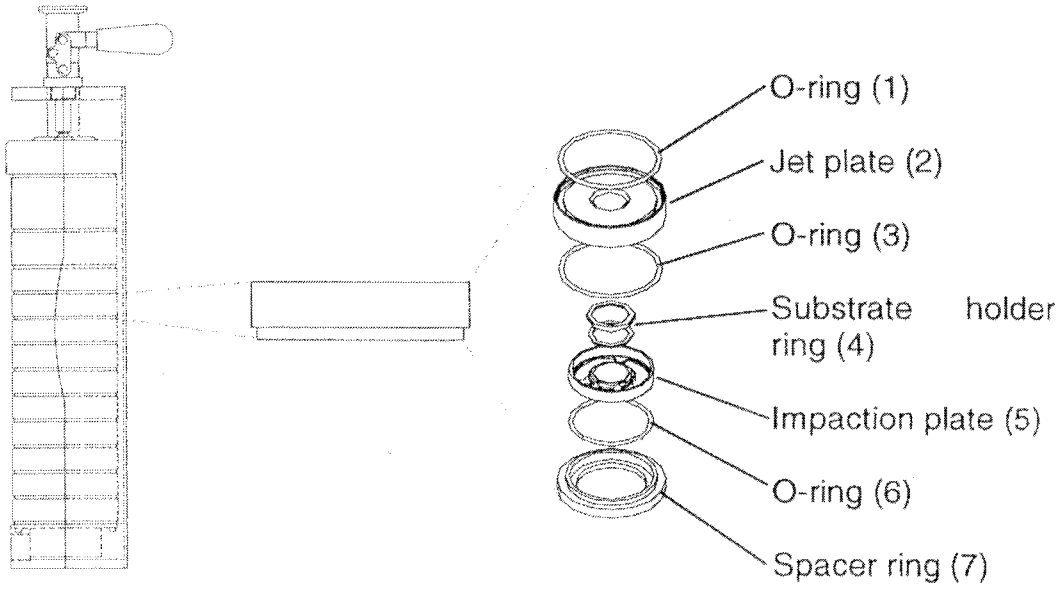


Bild 4.5: Schematischer Aufbau des Niederdruck-Impaktors vom Typ LPI 20 (Firma Dekati)

Die Bestimmung der H_2SO_4-Konzentration im Abgas der Ölfeuerungen erfolgte nach einem Verfahren, welches von der Firma Shell entwickelt wurde (Chory (1962) und Shell, 1968). Bei diesem Messverfahren wird eine Probengasstrom zwischen 5 bis 7 l/min über ein Quarzglas-Übergangsstück (bei höheren Partikelbeladungen mit Filterstopfen aus Quarzfasern) durch einen Glas-Schlangenkühler mit Fritte 1 G 4 (nachfolgend als SO_3-Turm bezeichnet) geleitet, in dem die dampfförmige Schwefelsäure durch Unterschreitung des Säuretaupunktes kondensiert. Das Kondensat wird mit Waschflüssigkeit (5%-ige Isopropanollösung mit Bromphenolblau als Indikator) ausgewaschen und anschließend wird die H_2SO_4-Konzentration in der Waschflüssigkeit durch Titration mit Natriumhydroxid (0,01 mol/l NaOH) bestimmt.

Mittels eines Umlaufthermostaten wurde ein Wasserstrom mit einer Temperatur von 60 °C erzeugt, der durch den SO_3-Turm geleitet wurde. Bei dieser Temperatur im SO_3-Turm ist davon auszugehen, dass bei einer Säuretaupunkttemperatur von etwa 110 °C das im Probengas enthaltenes H_2SO_4 in den Glaswendeln vollständig kondensiert und dort oder spätestens in der Glasfritte aus dem Gasstrom abgeschieden wird. Eine Kondensation von Wasserdampf (Wasserdampftaupunkt ca. 50 °C) findet bei dieser Temperatur im SO_3-Turm noch nicht statt. So zeigten sich bei den Probenahmen auch erste Wasserdampftröpfchen erst nach dem SO_3-Turm in der anschließenden Probengasleitung aus PVC. Nach dem SO_3-Turm gelangt der Abgasteilstrom in einen Kondensatbehälter, dieser steht in einem Wasserbad von ca. 6 bis 10 °C und einen Trockenturm. Eine durchflussgeregelte Pumpe zur Förderung des Probengasstroms wurde nach dem Trockenturm aufgebaut. Die Pumpe ist mit einem Gaszähler verbunden.

Nach Ende der Probenahme erfolgte im Labor das Auswaschen der abgeschiedenen Schwefelsäure aus dem Übergangsstück und ggf. dem Filterstopfen aus Quarzfasern sowie dem SO_3-Turm mittels zweier Waschdurchgänge mit jeweils 50 ml Waschflüssigkeit.

Die beiden Waschflüssigkeiten wurden jeweils getrennt mit NaOH bis zum Farbumschlag des Indikators titriert. Die getrennte Titration der Waschflüssigkeit diente im wesentlichen zur Kontrolle der Vollständigkeit der Schwefelsäure-Auswaschung. Damit der Farbumschlag des Indikators von grünlichgelb nach blauviolett und dessen Farbton zuverlässig und mit geringen Abweichungen erkannt wurde, erfolgte die Festlegung des Umschlagpunktes im Vergleich zu einer mit Indikator angesetzten und nicht verwendeten Waschflüssigkeit vor einem hellen Hintergrund. Die SO_3- bzw. H_2SO_4-Konzentration errechnet sich nach folgender Formel (Chory (1962) und Shell, 1968):

$$SO_3 \text{ in } mg/m^3 = F * T * N / V \qquad (4.1) \text{ bzw.}$$

$$H_2SO_4 \text{ in } mg/m^3 = SO_3 * 1{,}23 \qquad (4.2)$$

mit:
- F: Faktor beinhaltet das Neutralisationsvermögen der verwendeten Titrierlösung (F1 = 11,2) und die Umrechnung von ppm in mg/m^3 für SO_3 (F2 = 3,57). F = F1 * F2 = 39,98
- T: Titrationswert als Summe aus den beiden Waschdurchgängen in ml
- N: Normalität der verwendeten Natronlauge (hier: 0,01 n)
- V: trockenes Probenahmevolumen in m^3 im Normzustand (273,15 °C, 1.013,25 mbar).

Vor einer erneuten Probenahme wurde der SO_3-Turm gründlich mit Wasser (u.U. mit Zusätzen von Reinigungsmitteln) oder anderen Reinigungslösungen (z.B. Chrom-Schwefelsäure) gereinigt, neutralisiert, mit Aceton gespült und vollständig getrocknet.

Neben den bereits genannten Messwerten wurden im Abgas der Ölfeuerung kontinuierlich die Konzentrationen von O_2, CO und VOC (exemplarisch) und die Abgastemperatur sowie der Unterdruck im Schornstein gemessen. Außerdem wurde in regelmäßigen Zeitabständen die Rußzahl nach Bacharach ermittelt. In **Tabelle 4.3** sind die verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrate für das Planfilterkopfgerät und den Kaskadenimpaktor aufgelistet.

Zur Ermittlung von Partikelinhaltsstoffen, wie z.B. Schwefel oder Schwermetalle, wurde die Röntgen-Fluoreszenz-Analyse bei ausgewählten Filtersubstraten angewendet. Bei diesem Analysenprinzip wird der Analyt mit Röntgenstrahlung (Primärstrahlung) zur Aussendung von Fluoreszenzstrahlung (Sekundärstrahlung) angeregt. Die Fluoreszenzstrahlung ist für jedes Element spezifisch (qualitativer Nachweis). Mit diesem Analysenverfahren können alle Elemente des Periodensystems die schwerer als Fluor sind, mit Ausnahme der Edelgase, detektiert werden.

Tabelle 4.3: Angaben zu wichtigen Messtechniken und zu den eingesetzten Filtersubstraten bei den durchgeführten Messungen an den Ölfeuerungen

Messgröße (Messprinzip) und Messgerät (Typ, Hersteller)	Messbereich / Filterbehandlung	Prüfgaskonzentration [2] / Filtersubstrate (Typ, Herst.)	im Bericht angegebene Größe
O_2 (paramagnetische Eigenschaften von Sauerstoff): BINOS 100 Firma Fisher-Rosemount	0-21 Vol%	20,93 Vol% O_2	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): s.o.	0-1.000 ppm v/v	81,4 ppm v/v in N_2	mg/m³ und mg/MJ
VOC (Flammenionisation) [1]: FID 109 A Firma J.U.M. Engineering	0-1.00 ppm v/v	69,0 ppm v/v Propan in N_2	mgC/m³ und mgC/MJ (angegeben als Kohlenstoffmasse)
Gastemperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Partikel: Planfilterkopfgerät (Gravimetrie): Staubmesseinrichtung STE Firma Ströhlein	Filterbehandlung vor Probenahme: Konditionierung im Trockenofen für 2 h bei 135 bzw. 150 °C, Equibrilierung im Exsikkator mit Silikagel bis Gewichtskonstanz, Wägung	Filtersubstrate: Quartz Microfibre MK 360, 50 mm, Firma Munktell Filter AB, S-Grycksbo	Partikelkonzentration mit Planfilter: mg/m³ und mg/MJ
Impaktor (Strömungstrennverfahren): Typ LPI 20 mit gerader Entnahmesonde, Firma Dekati Ltd, Osuusmyllynkatu 13,FIN-33700 Tampere, Finnland	nach Probenahme: Equibrilierung im Exsikkator mit Silikagel bis Gewichtskonstanz, Wägung	PTFE Membranfilter, 25 mm, 0,2 µm Porengröße, Firma Sartorius AG, Weender Landstrasse 94-108, D-37075 Göttingen	Partikelgrößenverteilung: anteilige Partikelmasse in % der Trennstufe bezogen auf die insgesamt im Impaktor abgeschiedene Masse
Als Waage wurde das Modell MC 1 RC 210 P der Firma Sartorius AG verwendet. Die Waage weist eine Reproduzierbarkeit und Linearitätsabweichung im eingestellten Wägebereich bis 5 g von jeweils 0,02 mg auf. Die Waage ist in einem speziellen Wägeraum untergebracht.			

[1] bei den VOC-Messungen wurde ein beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas

[2] die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalysatoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

4.4 Beschreibung der untersuchten Heizkessel mit Ölgebläsebrennern

Die Messungen bei den Ölfeuerungen wurden an einem marktüblichen Guss-Heizkessel mit einem gelbbrennenden Ölgebläsebrenner und einem älteren Stahl-Heizkessel mit Brennkammereinsatz und ebenfalls gelbbrennenden Gebläsebrenner untersucht. Beide Ölbrenner sind einstufige Geräte. Die Brenner/Gusskessel-Kombination wird als typischer Vertreter für den Bestand an installierten Anlagen angesehen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Die Brenner/Stahlkessel-Kombination wird als typischer Vertreter für den Bestand an installierten Anlagen angesehen, die dem Stand der Technik von Altgeräten entsprechen. In **Tabelle 4.4** sind wichtige Merkmale zu den eingesetzten Heizgeräten aufgeführt.

Die Brennereinstellungen wurden, mit Ausnahme der nicht optimalen Einstellungen mit erhöhten Rußzahlen, entsprechend den Herstellerangaben vorgenommen. Die Brennerleistungen wurde so eingestellt, dass die Wärmeleistung der Kessel in etwa der Nennwärmeleistung (21 kW) entsprach.

Tabelle 4.4: Wichtige Merkmale der untersuchten Ölfeuerungen

Ölfeuerungen	Guss-Heizkessel - Neugerät		Stahl-Heizkessel - Altgerät	
	Heizkessel	Ölgebläsebrenner	Heizkessel	Ölgebläsebrenner
Hersteller	Buderus Heiztechnik GmbH	Max Weishaupt GmbH	Buderus Heiztechnik GmbH	Elco Klöckner Heiztechnik GmbH
Typ	G 115-21 RE	WL 10-B, Ausführung H mit Flammkopf W 10/5	Keratherm-Ecomatic 14 TE-PG (18)	KL 20.1a, Ausführung 2.1 mit MZE I
NWL in kW [1]	21	16,5 bis 38	17 bis 21	12 bis 59
Baujahr	1996	1997	1984	1984
Bemerkungen	Dreizugkessel	Flammenstabilisierung mit Stauscheibe, Ölvorwärmung	Zweizugkessel mit Heizgas-Umlenkschirm, Züge mit Turbolatoren	Flammenstabilisierung mit Stauscheibe, ohne Ölvorwärmung

[1] NWL: Nennwärmeleistung bzw. Nennwärmeleistungsbereich

Die Partikelmessungen wurden im stationären Dauerbetrieb der Heizkessel bei Vor- bzw. Rücklauftemperaturen im Bereich von 70 bzw. 50 °C vorgenommen. Beim erstmaligen Einsatz der Kessel bzw. vor jedem Wechsel der Ölqualität wurden die Kessel und Brenner gründlich trocken gereinigt. Darüber hinaus wurden beim Altgerät defekte und verschlissene Komponenten (Brennerdüse, Ölpumpe und Heizgas-Umlenkschirm) ausgetauscht. Vor jedem Messbeginn wurden die Heizkessel über mindestens eine Stunde betrieben, um stationäre Zustände zu erhalten.

4.5 Angaben zu den eingesetzten Heizölqualitäten

Tabelle 4.5 enthält eine Zusammenstellung wichtiger Analysenwerte der untersuchten Heizölqualitäten. Die Angaben basieren auf Ölanalysen des Brennstoffherstellers. Bei abnehmendem Schwefelgehalt des Heizöls gehen auch die Stickstoffgehalte im Öl stark zurück.

Tabelle 4.5: Angaben zu den untersuchten Heizölqualitäten

Bezeichnung der Ölqualität		**HEL 0,14 S**	**HEL 0,1 S**	**HEL 0,05 S**	**HEL 0,001 S**
Heizwert (H_u)	[MJ/kg	42,7	42,7	42,8	43,1
Dichte bei 15 °C	[kg/m^3]	854,0	854,4	851,1	823,7
Viskosität bei 20 °C	[mm^2/s]	3,727	3,689	5,776	3,224
Flammpunkt	[°C]	64	66	75	73
Siedebeginn	[°C]	164	165	180	191
Siedeende	[°C]	389	390	377	314
Rückstand	[% v/v]	1,9	1,6	2,3	2,0
Wassergehalt	[mg/kg]	73	72	57	97
Stickstoffgehalt	[mg/kg]	466	473	228	11
Schwefelgehalt	[% m/m]	0,14	0,10	0,0538	0,0014
	[ppm]	1.400	1.000	538	14

Anmerkung: die Ölanalysen wurden von Shell Global Solutions (Deutschland), Deutsche Shell GmbH, PAE-Labor, Abteilung OGMF/1 in Hamburg durchgeführt

Bei den anderen aufgeführten Werten sind zwischen den einzelnen Ölqualitäten keine sehr großen Unterschiede vorhanden. Die Aschegehalte - in der Tabelle nicht aufgeführt - lagen bei allen Heizölqualitäten niedriger als 0,001 Massen-%.

Mit der Heizölqualität HEL 0,14 S wurden beim Altgerät auch Partikelmessungen unter Zusatz eines Heizöladditivs mit dem Wirkstoff Ferrocen (Verbrennungsverbesserer) bei zwei unterschiedlichen Dosierungen durchgeführt.

Ferrocen ($Fe(C_5H_5)_2$) ist aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften vielseitig einsetzbar. Ferrocen ist ein wirksamer Katalysator bei Verbrennungsverfahren und bei chemischen Oxidationsverfahren. So erhöht sich z.B. bei dessen Zusatz in Brennstoffen die Verbrennungs- und Oxidationsgeschwindigkeit von Ruß und in Kraftstoffen die Klopffestigkeit, in Kunststoffen wirkt Ferrocen flamm- und rauchmindernd und bei Dieselpartikelfiltern durch Senkung der Zündtemperatur von Ruß als Regenerationshilfe. Darüber hinaus besitzt Ferrocen als einzige eisenorganische Substanz den Anwendungsvorteil, dass es sich leicht und vollkommen in Heizölen löst und sich gegenüber anderen im Öltank befindlichen Komponenten neutral verhält (Jungbluth et al., 1999). In verschiedenen Untersuchungen wurde die Wirksamkeit von ferrocenhaltigen Additiven als Verbrennungsverbesserer untersucht, so z.B. beim Einsatz in Schwerölfeuerungen von Hoenig (1991) und bei Heizöl EL-Feuerungen von Hornig et al. (1997 und 1998) und vom RWTÜV (1998).

Bei den Messungen in diesem Vorhaben wurde ein Additiv der Firma Octel Deutschland GmbH in Herne mit dem Handelsnamen SuperHeizöl ecotherm® verwendet. Nach Herstellerangaben enthält dieses Additiv neben Ferrocen weitere Wirkstoffe in marktüblicher Beimischung (z.B. Stoffe zur Erhöhung der Lagerstabilität des Heizöls und Duftstoffe). Aufgrund der Marktstellung des Herstellers und dem Absatzanteil des ausgewählten Heizöladditivs wird es als typischer Vertreter für diese Produkte angesehen.

Dieses Additiv wurde beim Altgerät entsprechend den Anwendungshinweisen im Verhältnis 1:2.000 der Heizölqualität HEL 0,14 S zudosiert. Aufgrund neuer Untersuchungsergebnisse über den Zusammenhang von Wirksamkeit und Ferrocenkonzentration (Hornig, 2001) wurde das Additiv auch in einem reduzierten Verhältnis von 1:4.000 eingesetzt.

4.6 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden bei den kontinuierlich erfassten Größen alle während der Partikelprobenahme registrierten 60-Sekunden-Mittelwerte verwendet. Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC-, H_2SO_4- und Partikelkonzentrationen auf den Bezugssauerstoffgehalt von 3 Vol% O_2 im trockenen (bzw. für VOC im feuchten) Abgas erfolgte mittels der gemessenen O_2-Konzentration nach folgender Formel (1. BImSchV, 2001):

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \qquad [mg/m^3] \qquad (4.3)$$

mit: E_B: Emissionskonzentration, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
E_M: im Abgas gemessene mittlere Emissionskonzentration
$O_{2,B}$: Bezugssauerstoffgehalt (hier: 3 Vol%)
$O_{2,M}$: im Abgas gemessene mittlere Sauerstoffkonzentration in Vol%.

Die Emissionskonzentrationen wurden zusätzlich auf energiebezogene Werte nach folgender Formel umgerechnet:

$$E_{Hu} = E_B * V_B / H_u \qquad [mg/MJ \text{ bzw. } kg/TJ] \qquad (4.4)$$

mit: E_{Hu}: auf Heizwert bezogener Emissionsfaktor in mg/MJ bzw. kg/TJ
E_B: Emissionskonzentration, siehe Formel (4.3)
V_B: spezifisches Abgasvolumen im Normzustand (je nach Messgröße "feucht" oder "trocken") bei 3 Vol% O_2 in m^3/kg
H_u: Heizwert des Brennstoffes in MJ/kg.

Der Umrechnungsfaktor V_B / H_u hängt von der Brennstoffzusammensetzung und dem Bezug auf trockenes (für die Messgrößen CO, Partikel und H_2SO_4) oder feuchtes Abgas (für die Messgröße VOC) ab. Die berechneten Umrechnungsfaktoren sind in **Tabelle 4.6** aufgelistet.

Tabelle 4.6: Umrechnungsfaktoren V_B / H_u zur Berechnung der heizwertbezogenen Emissionsfaktoren nach Formel 4.4 für die Messungen an Ölfeuerungen

Umrechnungsfaktoren V_B / H_u für	Heizöle EL (alle Qualitäten)
CO, Partikel und H_2SO_4	0,29
VOC	0,32

5 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse für den marktüblichen Guss-Heizkessel (Neugerät) und den Stahl-Heizkessel (Altgerät) beschrieben und in einem zusammenfassenden Kapitel diskutiert.

5.1 Guss-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner

Das Emissionsverhalten des in diesem Vorhaben untersuchten Guss-Heizkessels mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner wurde beim Einsatz von Heizölen EL mit unterschiedlichem Schwefelgehalt und zwei verschiedenen Brennereinstellungen erfasst. Die Brenner- und Leistungseinstellung wurde, mit Ausnahme der nicht optimalen Einstellung mit erhöhter Rußzahl, nach Angaben der Hersteller vorgenommen. Die Messungen erfolgten im stationären Dauerbetrieb des Kessels im Bereich der Nennwärmeleistung. In **Tabelle 5.1** sind die Messergebnisse für den Guss-Heizkessel zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Messergebnisse für den Guss-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner und Heizölen EL unterschiedlichen Schwefelgehalts bei Nennwärmeleistung

Guss-Heizkessel (Neugerät) (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Heizöl EL mit der Qualitätsbezeichnung				
			HEL 0,14 S (Rußzahl: 1)	HEL 0,14 S (Rußzahl: 0)	HEL 0,1 S (Rußzahl: 0)	HEL 0,05 S (Rußzahl: 0)	HEL 0,001 S (Rußzahl: 0)
allgemeine Angaben	verfeuerte Brennstoffmenge	l	45	296	145	110	202
	Versuchsdauer insgesamt	min	1.394	8.051	3.859	2.877	5.175
	Vorlauftemperatur	°C	63	68	70	68	67
	Rücklauftemperatur	°C	47	49	52	48	48
	Heizwert des Brennstoffes	MJ/kg	42,7	42,7	42,7	42,8	43,1
unverdünntes Abgas	CO_2 - berechnet [1]	Vol%	12,2	13,4	13,3	13,5	13,4
	CO (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	64	38	42	42	42
	CO	kg/TJ	19	11	12	12	12
	VOC (bez. auf 3 Vol% O_2)	mgC/m³	-	< 5	< 5	< 5	< 5
	VOC	kgC/TJ	-	< 2	< 2	< 2	< 2
	NO_x (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	-	197	191	161	123
	NO_x	kg/TJ	-	57	55	47	36
	SO_2 - berechnet [1] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	230	230	164	88	2
	SO_2	kg/TJ	67	67	48	26	1
	H_2SO_4 (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	-	*2,29*	*1,42*	*0,80*	*0,11*
	H_2SO_4	*kg/TJ*	-	*0,67*	*0,41*	*0,23*	*0,03*
	filterbare Partikel [2] (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	-	*0,07*	*0,10*	*0,10*	*0,07*
	filterbare Partikel [2]	*kg/TJ*	-	*0,02*	*0,03*	*0,03*	*0,02*
	Partikel [3] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	-	2,37	1,51	0,90	0,18
	Partikel [3]	kg/TJ	-	0,69	0,44	0,26	0,05
	Abgastemperatur	°C	122	133	124	129	127
Wärmeleistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	19,8	22,8	23,1	23,5	24,2
	Wärmeleistung (WL)	kW	18,9	21,6	22,0	22,3	23,0
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	90	103	105	106	110

- keine Messwerte vorhanden
[1] CO_2 aus gemessener O_2-Konzentration und SO_2 aus Brennstoffzusammensetzung berechnet
[2] mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen
[3] Partikelemission insgesamt als Summe von filter- und kondensierbaren Partikeln

Beim Betrieb des Heizkessels mit den unterschiedlichen Heizölqualitäten und bei einer Brennereinstellung mit der Rußzahl 0 sind keine Unterschiede bei den gemessenen Konzentrationen an CO_2, CO, VOC und filterbaren Partikeln feststellbar. Die unterschiedlichen Schwefel- und Stickstoffgehalte der Heizöle führen aber zu erheblichen Unterschieden bei den gemessenen H_2SO_4- und NO_x-Konzentrationen. So werden bei den Ölqualitäten mit dem höchsten Schwefelgehalt (HEL 0,14 S) und den höchsten Stickstoffgehalten (HEL 0,14 S und HEL 0,1 S) auch die höchsten Emissionskonzentrationen der betreffenden Komponenten gemessen. Beim nahezu vollständig entschwefelten Heizöl, welches auch einen sehr geringen Stickstoffgehalt aufweist, wird im Abgas kaum noch H_2SO_4 ermittelt und auch die NO_x-Konzentrationen sind vergleichsweise gering.

Beim Brennerbetrieb mit Rußzahl 1 wurden erwartungsgemäß erhöhte CO-Konzentrationen ermittelt. Aufgrund von Messgeräteausfällen liegen hier keine Daten zu den Emissionen von VOC, NO_x und filterbaren Partikeln vor.

In **Bild 5.1** sind für den Guss-Heizkessel die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel für die Heizölqualität HEL 0,14 S bei unterschiedlichen Brennereinstellungen (Rußzahlen) und im Vergleich für die Heizölqualitäten HEL 0,14 S und HEL 0,001 S dargestellt.

Beim Betrieb des Heizkessels mit marktüblichem Heizöl (HEL 0,14 S) und unterschiedlichen Brennereinstellungen ändert sich die Größenverteilung der Partikel geringfügig. So nehmen bei einer Brennereinstellung mit Rußzahl 1 die Anteile der Partikel mit aerodynamischen Durchmessern > 1,0 µm im Vergleich zur Rußzahl 0 tendenziell zu. Kleinere Partikel nehmen hingegen in der Tendenz ab.

Für die Heizölqualitäten mit dem höchsten (HEL 0,14 S) bzw. niedrigsten (HEL 0,001 S) Schwefelgehalt können bei der Größenverteilungen der im Abgas gemessenen Partikel keine systematischen Unterschiede festgestellt werden.

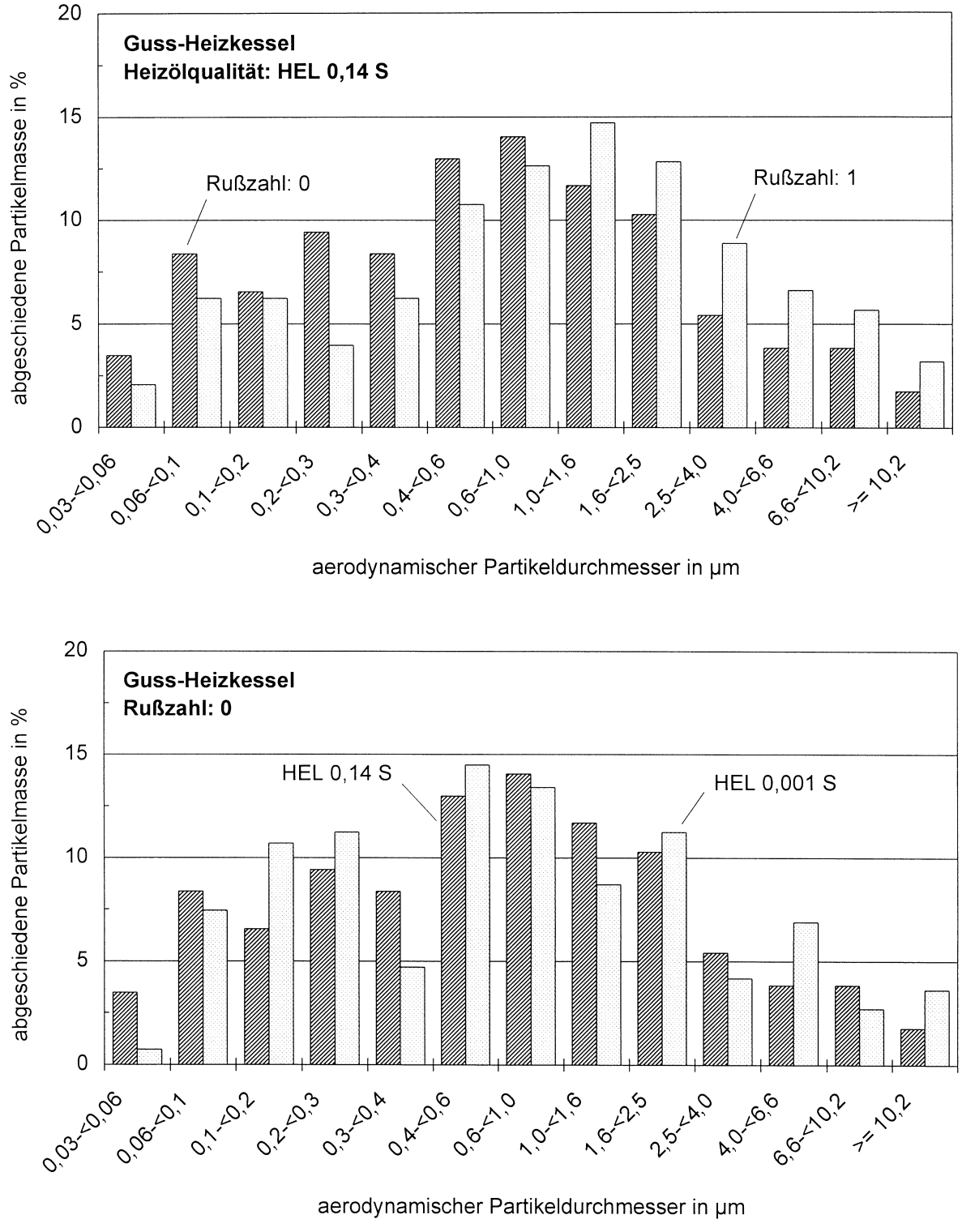


Bild 5.1: Größenverteilung der Partikel beim Guss-Heizkessel bei unterschiedlichen Brennereinstellungen (Rußzahlen) und Heizölqualitäten (HEL 0,14 S und HEL 0,001 S)

In **Tabelle 5.2** sind für den Gusskessel die berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x für den Betrieb mit Heizölen unterschiedlicher Qualität und mit verschiedenen Brennereinstellungen aufgelistet.

Tabelle 5.2: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Guss-Heizkessel bei unterschiedlichen Brennereinstellungen und Heizölqualitäten

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Guss-Heizkessel und Betrieb mit der Heizölqualität		
	HEL 0,14 S		HEL 0,001 S
	Rußzahl 1	Rußzahl 0	Rußzahl 0
PM_1	48,1	63,2	62,7
$PM_{2,5}$	75,7	85,1	82,6
PM_{10}	96,5	98,0	96,2

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Guss-Heizkessel beim Betrieb mit den beiden Heizölqualitäten nahezu identisch. Auch beim Betrieb mit marktüblichem Heizöl und unterschiedlichen Brennereinstellungen unterscheiden sich nur die Anteile der Fraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ etwas deutlicher.

5.2 Stahl-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner

Das Emissionsverhalten des Stahl-Heizkessels mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner wurde beim Einsatz von Heizölen EL mit unterschiedlichem Schwefelgehalt und zwei verschiedenen Brennereinstellungen ermittelt. Außerdem wurde bei marktüblichem Heizöl EL der Einfluss eines Heizöladditivs (Verbrennungsverbesserer) auf die Partikelemission untersucht. Die Brenner- und Leistungseinstellung wurde, mit Ausnahme der nicht optimalen Einstellung mit erhöhter Rußzahl, nach Angaben der Hersteller vorgenommen. Die Messungen erfolgten im stationären Dauerbetrieb des Kessels im Bereich der Nennwärmeleistung. Zuerst sind in **Tabelle 5.3** die Messergebnisse für den Stahl-Heizkessel beim Einsatz der verschiedenen Heizölqualitäten zusammengestellt.

Beim Betrieb des Heizkessels mit den unterschiedlichen Heizölqualitäten und bei einer Brennereinstellung mit der Rußzahl 0-1 sind kaum Unterschiede bei den gemessenen Konzentrationen an CO_2, CO und VOC feststellbar. Bei den gemessenen Konzentrationen an filterbaren Partikeln ergab sich eine Bandbreite von 0,10 bis 0,25 mg/m^3. Für diese größere Streuung der filterbaren Anteile an den Partikelkonzentrationen ist das nicht vollständig stabile Betriebsverhalten des Brenners verantwortlich. So änderte sich während den langen Probenahmezeiten entsprechend dem Verlauf der Verbrennungslufttemperatur und der Druckverhältnisse auch die CO_2-Konzentration im Abgas des Heizkessels. Mit zunehmender CO_2-Konzentration und damit abnehmendem Luftüberschuss erfolgt beim Altgerät, sobald die obere Grenze des angegeben Einstellbereichs (Sollwert CO_2: 12 bis 13 Vol%) erreicht oder leicht überschritten wird, ein deutlicher Anstieg der CO- und VOC-Konzentrationen sowie der Rußzahl.

Tabelle 5.3: Messergebnisse für den Stahl-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner und Heizölen EL unterschiedlicher Schwefelgehalte bei Nennwärmeleistung

Stahl-Heizkessel (Altgerät) (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Heizöl EL mit der Qualitätsbezeichnung				
			HEL 0,14 S (Rußzahl: 0-1)	HEL 0,1 S (Rußzahl: 0-1)	HEL 0,05 S (Rußzahl: 0-1)	HEL 0,001 S (Rußzahl: 0-1)	HEL 0,001 S (Rußzahl: 1-3)
allgemeine Angaben	verfeuerte Brennstoffmenge	l	68	144	147	80	45
	Versuchsdauer insgesamt	min	2.045	4.248	4.001	2.610	1.251
	Vorlauftemperatur	°C	64	63	64	64	64
	Rücklauftemperatur	°C	48	48	46	47	47
	Heizwert des Brennstoffes	MJ/kg	42,7	42,7	42,8	43,1	43,1
unverdünntes Abgas	CO_2 - berechnet [1]	Vol%	12,7	12,5	12,6	12,6	11,9
	CO (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	30	37	30	34	31
	CO	kg/TJ	9	11	9	10	9
	VOC (bez. auf 3 Vol% O_2)	mgC/m³	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
	VOC	kgC/TJ	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
	NO_x (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	209	206	184	128	187
	NO_x	kg/TJ	61	60	53	37	-
	SO_2 - berechnet [1] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	230	164	88	2	2
	SO_2	kg/TJ	67	48	26	1	1
	H_2SO_4 (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	*1,73*	*1,11*	*0,54*	*< 0,05*	-
	H_2SO_4	*kg/TJ*	*0,50*	*0,32*	*0,16*	*< 0,01*	-
	filterbare Partikel [2] (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	*0,10*	*0,19*	*0,10*	*0,25*	*1,72*
	filterbare Partikel [2]	*kg/TJ*	*0,03*	*0,05*	*0,03*	*0,07*	*0,50*
	Partikel [3] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	1,83	1,30	0,64	0,25	-
	Partikel [3]	kg/TJ	0,53	0,38	0,19	0,07	-
	Abgastemperatur	°C	124	124	134	125	154
Wärmeleistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	20,4	20,8	22,7	18,7	22,2
	Wärmeleistung (WL)	kW	19,3	19,7	21,3	17,7	20,6
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	92	94	102	84	98

- keine Messwerte vorhanden
1 CO_2 aus gemessener O_2-Konzentration und SO_2 aus Brennstoffzusammensetzung berechnet
2 mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen
3 Partikelemission insgesamt als Summe von filter- und kondensierbaren Partikeln

Die unterschiedlichen Schwefel- und Stickstoffgehalte der Heizöle führen auch bei diesem Heizkessel zu erheblichen Unterschieden bei den gemessenen H_2SO_4- und NO_x-Konzentrationen. So wird bei der Ölqualität mit dem höchsten Schwefelgehalt (HEL 0,14 S) ebenfalls die höchste H_2SO_4-Konzentration ermittelt. Bei der Verbrennung von nahezu schwefelfreiem Heizöl war Schwefelsäure im Abgas nicht mehr sicher nachweisbar.

Bei der Verbrennung der Ölqualitäten HEL 0,14 S und HEL 0,1 S, die geringe Unterschiede im Stickstoffgehalt aufweisen, wurden im Abgas praktisch identische NO_x-Konzentrationen bei unterschiedlichen CO_2-Konzentrationen und Feuerungswärmeleistungen ermittelt. Beim Stahl-Heizkessel war eine exakt reproduzierbare Einstellung des Luftüberschusses, und damit der CO_2-Konzentration, nicht möglich. Bei den anderen beiden untersuchten Ölqualitäten nahmen die NO_x-Emissionen entsprechend den Stickstoffgehalten im Brennstoff deutlich ab.

Beim Brennerbetrieb mit Rußzahl 1-3 wurde erwartungsgemäß eine erhöhte Konzentration von filterbaren Partikeln im Abgas ermittelt. Diese Erhöhung der Rußzahl hatte beim Stahl-Heizkessel noch keinen Einfluss auf die CO-Konzentration, die bezogen auf 3 Vol% O_2 praktisch unverändert blieb. Aufgrund der erhöhten Partikelkonzentration im Abgas konnte mit

dem vorhandenen Versuchsaufbau keine Bestimmung der H_2SO_4-Konzentration durchgeführt werden, da sich trotz eines Filterstopfens aus Quarzfasern im Übergangsstück zum SO_3-Turm dessen feine Fritte nach kurzer Zeit mit Partikeln zusetzte und einen zu hohen Druckverlust verursachte. Hierdurch konnte der für die Probenahme eingestellte Volumenstrom nicht mehr aufrecht erhalten werden.

Die Versuchsergebnisse am Stahl-Heizkessel mit marktüblichem Heizöl EL unter Zusatz eines ferrocenhaltigen Heizöladditivs sind in **Tabelle 5.4** zusammengestellt.

Tabelle 5.4: Messergebnisse für den Stahl-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner und marktüblichem Heizöl ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv bei Nennwärmeleistung

Stahl-Heizkessel (Altgerät) (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Heizöl EL mit der Qualitätsbezeichnung HEL 0,14 S		
			ohne Additiv	mit Additiv und Dosierung	
				1:2.000	1:4.000
			(Rußzahl: 0-1)	(Rußzahl: ~ 0)	(Rußzahl: ~ 0)
allgemeine Angaben	verfeuerte Brennstoffmenge	l	68	70	42
	Versuchsdauer insgesamt	min	2.045	2.100	1.217
	Vorlauftemperatur	°C	64	63	62
	Rücklauftemperatur	°C	48	47	47
	Heizwert des Brennstoffes	MJ/kg	42,7	42,7	42,7
unverdünntes Abgas	CO_2 - berechnet [1]	Vol%	12,7	12,4	12,4
	CO (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	30	30	32
	CO	kg/TJ	9	9	9
	VOC (bez. auf 3 Vol% O_2)	mgC/m³	< 5	-	-
	VOC	kgC/TJ	< 2	-	-
	NO_x (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	209	221	-
	NO_x	kg/TJ	61	64	-
	SO_2 - berechnet [1] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	230	230	230
	SO_2	kg/TJ	67	67	67
	H_2SO_4 (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	*1,73*	*2,12*	-
	H_2SO_4	*kg/TJ*	*0,50*	*0,62*	-
	filterbare Partikel [2] (bez. auf 3 Vol% O_2)	*mg/m³*	*0,10*	*0,72*	*0,37*
	filterbare Partikel [2]	*kg/TJ*	*0,03*	*0,21*	*0,11*
	Partikel [3] (bez. auf 3 Vol% O_2)	mg/m³	1,83	2,84	-
	Partikel [3]	kg/TJ	0,53	0,82	-
	Abgastemperatur	°C	124	124	123
Wärmeleistung	Feuerungswärmeleistung (FWL)	kW	20,4	20,5	21,1
	Wärmeleistung (WL)	kW	19,3	19,4	19,9
	auf Nennwärmeleistung bezogene WL	%	92	92	95

- keine Messwerte vorhanden
[1] CO_2 aus gemessener O_2-Konzentration und SO_2 aus Brennstoffzusammensetzung berechnet
[2] mit dem Planfilterkopfgerät ermittelten Partikelkonzentrationen
[3] Partikelemission insgesamt als Summe von filter- und kondensierbaren Partikeln

Durch die Zugabe des ferrocenhaltigen Additivs zur Ölqualität HEL 0,14 S ergab sich, bei etwas geringerer CO_2-Konzentration im Abgas, eine Abnahme der Rußzahl von 0-1 auf Schwärzungsgrade nahe 0. In Abhängigkeit der Additivdosierung ergab sich ein Konzentrationsanstieg von filterbaren Partikeln im Abgas von 0,10 mg/m³ beim marktüblichen Heizöl auf 0,37 bzw. 0,72 mg/m³ bei Mischungsverhältnissen für das Additiv von 1:4.000 bzw. 1:2.000.

Die Bestimmung der Rußzahl erfolgt anhand des optischen Vergleichs einer mit Abgas beaufschlagten Filterfläche und von Kontrollflächen unterschiedlicher Schwärzungsgrade, denen entsprechende Zahlenwerte zugeordnet sind. Ein Zusammenhang zwischen Rußzahl und Partikelkonzentration ist zwar grundsätzlich vorhanden, aber von vielen Faktoren abhängig. Somit kann nicht unmittelbar bei Änderung der Rußzahl darauf geschlossen werden, dass sich auch die Partikelkonzentration im Abgas proportional verändert.

Bei der Verbrennung des Heizöls zerfällt das im Additiv gelöste Ferrocen und die organischen Bestandteile der Verbindung und das Eisen werden in der Flamme oxidiert. Eine Hypothese über die Wirkungsweise des Ferrocen geht nun davon aus, dass sich das gebildete Eisenoxid (Fe_2O_3) in den ebenfalls in der Flamme gebildeten Ruß einlagert und somit die Oxidationsgeschwindigkeit des Rußes erhöht. Diese Rußpartikel können in der Flamme durch eine Reaktion des Kohlenstoffs mit den Eisenoxiden zerstört werden. Bei diesen Reaktionen mit dem Kohlenstoff der Rußpartikel bildet sich über mehrere Zwischenstufen wieder Eisenoxid, so dass der Katalysezyklus erneut beginnen kann (z.B. Jungbluth et al., 1999).

Die aktive Komponente Fe_2O_3 wird letztendlich emittiert (eigene Abschätzung anhand der Messergebnisse: zu ca. 90 %). Somit bewirken ferrocenhaltige Additive einerseits eine Minderung der Partikelemissionen durch die verstärkte Oxidation des Rußes und andererseits eine Erhöhung der filterbaren Partikelemission durch deren Freisetzung. Ob sich durch diese Additive die Partikelkonzentrationen im Abgas reduziert oder erhöht hängt somit von der Additivkonzentration im Brennstoff und dem Ausmaß der Rußminderung ab.

Unter definierten Betriebsbedingungen von Prüfständen und bei stationärem Dauerbetrieb sind im Abgas moderner Ölfeuerungen nur sehr geringe Rußkonzentrationen vorhanden. In diesen Fällen werden sich durch ferrocenhaltige Additive die Partikelkonzentrationen im Abgas erhöhen. Bei installierten Anlagen, wo der Wartungszustand und die Brennereinstellung mangelhaft sein kann, die Betriebsbedingungen mehr oder weniger großen Schwankungen unterliegen und beim praxisüblichen Ein-Aus-Betrieb kann sich eine andere Bewertung ergeben. So könnte sich in der Praxis, vor allem bei älteren Brenner/Kessel-Kombinationen oder bei Anlagen die auf Änderungen der Randbedingungen besonders empfindlich reagieren, eine Minderung der Partikelemissionen einstellen.

Ergebnisse einer Langzeituntersuchung auf dem Prüfstand über 750 Betriebsstunden an zwei taktend betriebenen Heizkesseln, die mit und ohne ferrocenhaltigem Heizöl EL betrieben wurden, könnten in diese Richtung weisen. So war die Rußzahl des mit additiviertem Heizöl betriebenen Kessels, bei gleicher Einstellung beider Systeme zu Beginn der Messungen mit Rußzahl 1, deutlich niedriger und die Heizflächenverschmutzung geringer als beim Vergleichskessel. Aufgrund unterschiedlicher Brennereinstellungen am Ende der Messungen war die geringere Heizflächenverschmutzung beim mit additiviertem Heizöl betriebenen Heizkessel nicht mit einer Erhöhung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades verbunden (RWTÜV, 1998).

Aktuelle Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeit des Additiv auch bei reduziertem Mischungsverhältnis stärker erhalten bleibt als bisher angenommen (Hornig, 2001). Somit ergibt sich durch die Optimierung des Mischungsverhältnisses ein zusätzliches Potential zur Partikelminderung.

Beim Betrieb des Heizkessels mit der Heizölqualität HEL 0,14 S mit ferrocenhaltigem Additiv nahm, im Vergleich zum nicht additiviertem Heizöl, die H_2SO_4-Konzentration zu. Inwieweit durch die Zunahme von katalytisch bedingter SO_3-Bildung das ferrocenhaltige Additiv diesen Anstieg beeinflusst hat, oder z.B. das erhöhte Sauerstoffangebot in der Flamme zu einer höheren SO_3-Bildungsrate geführt hat, kann anhand der durchgeführten Messungen nicht beurteilt werden.

Insgesamt ergaben sich bei den Versuchen ohne und mit Additiv geringe Abweichungen in den CO_2-Konzentrationen und auch geringfügige Unterschiede der gemessenen CO- und NO_x-Werte. Der Anstieg der NO_x-Konzentration beim Heizöl mit Additivzugabe (Dosierung 1:2.000) ist vor allem auf die Abhängigkeit dieser Emissionskomponente von der Brennereinstellung zurückzuführen. Mit zunehmendem Luftüberschuss und ansteigender Feuerungswärmeleistung nehmen auch die NO_x-Konzentrationen im Abgas des Stahl-Heizkessels zu. Geht z.B. die CO_2-Konzentration von 12,8 auf 12,2 Vol% zurück, so steigen bei einer Feuerungswärmeleistung von 21,2 kW die NO_x-Konzentrationen von 219 auf 225 mg/m³ (jeweils bezogen auf 3 Vol% O_2) an. Dieser Zusammenhang, der in einer separaten Versuchsreihe ermittelt wurde, ist in **Bild 5.2** dargestellt.

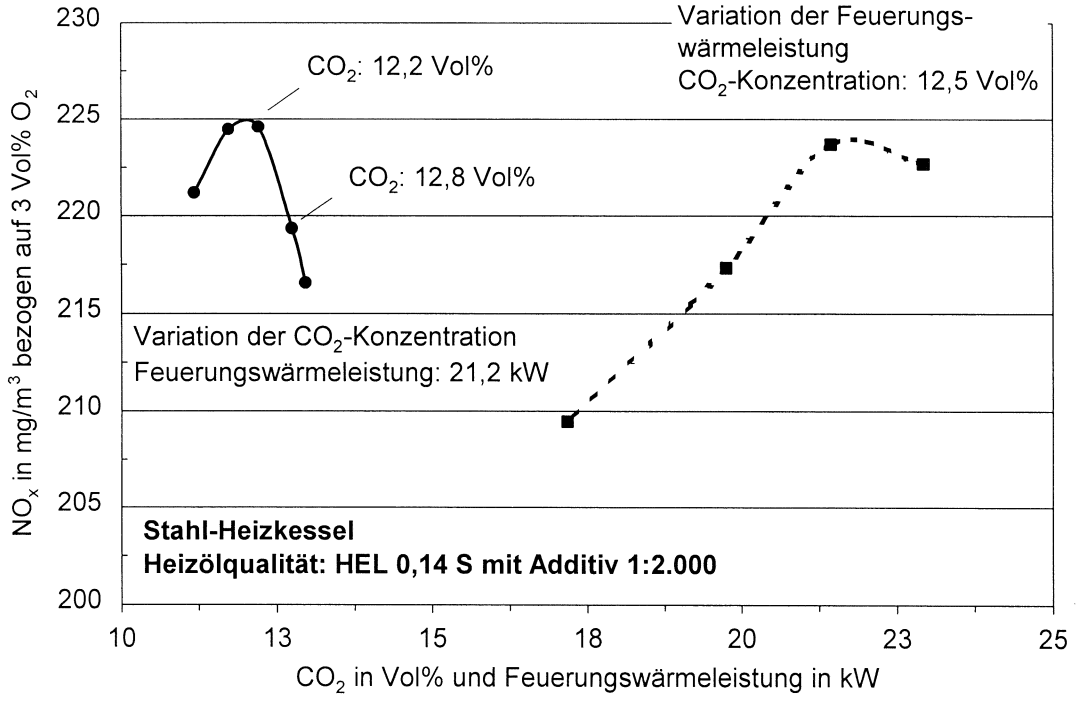


Bild 5.2: Zusammenhang zwischen der NO_x-Konzentration und CO_2-Konzentration im Abgas sowie der Feuerungswärmeleistung beim Stahl-Heizkessel

In **Bild 5.3** sind für den Stahl-Heizkessel die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel für die vier untersuchten Heizölqualitäten dargestellt.

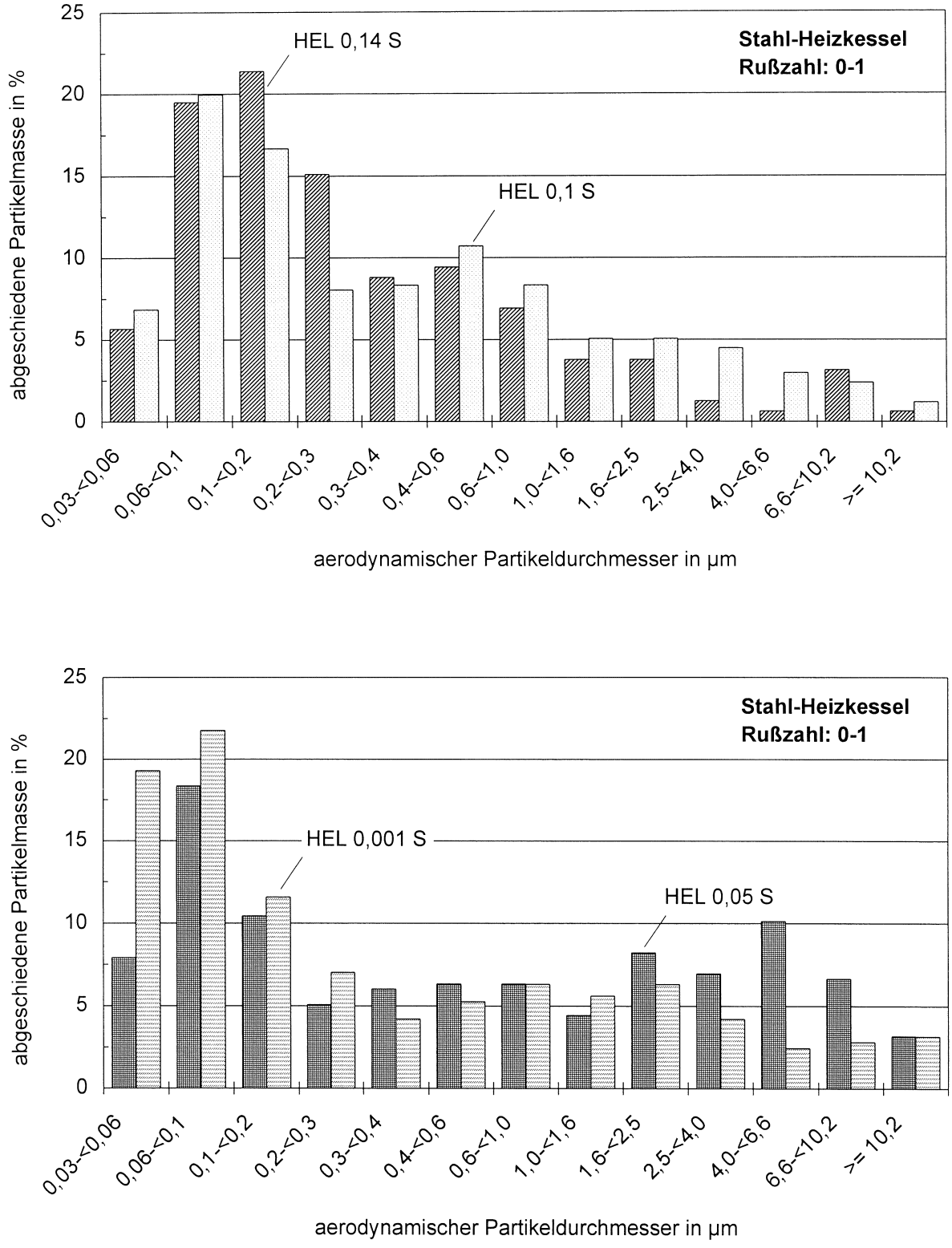


Bild 5.3: Größenverteilung der Partikel beim Stahl-Heizkessel für die untersuchten Heizölqualitäten bei Brennereinstellungen mit Rußzahlen zwischen 0 und 1

Die Größenverteilungen der Partikel sind beim Betrieb des Heizkessels mit den unterschiedlichen Heizölqualitäten insgesamt gut vergleichbar, wobei für einzelne Partikelgrößenbereiche doch Unterschiede vorhanden sind. So wurden z.B. für Partikel mit aerodynamischen Durchmessern zwischen 0,03 und 0,06 µm bei der Heizölqualität HEL 0,001 S ein wesentlich höherer Anteil an der insgesamt im Impaktor abgeschiedenen Partikelmasse als bei den anderen 3 Ölqualitäten gemessen. Auf der davor liegenden Trennstufe (Partikeldurchmesser 0,06 bis 0,1 µm) sind dagegen die prozentualen Massenanteile für alle Ölqualitäten praktisch identisch. Tendenzen oder Gesetzmäßigkeiten können aber aus den vorhandenen Unterschieden in den Partikelverteilungen nicht abgeleitet werden.

Bild 5.4 zeigt für den Stahl-Heizkessel die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel für die Heizölqualität 0,14 S ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv.

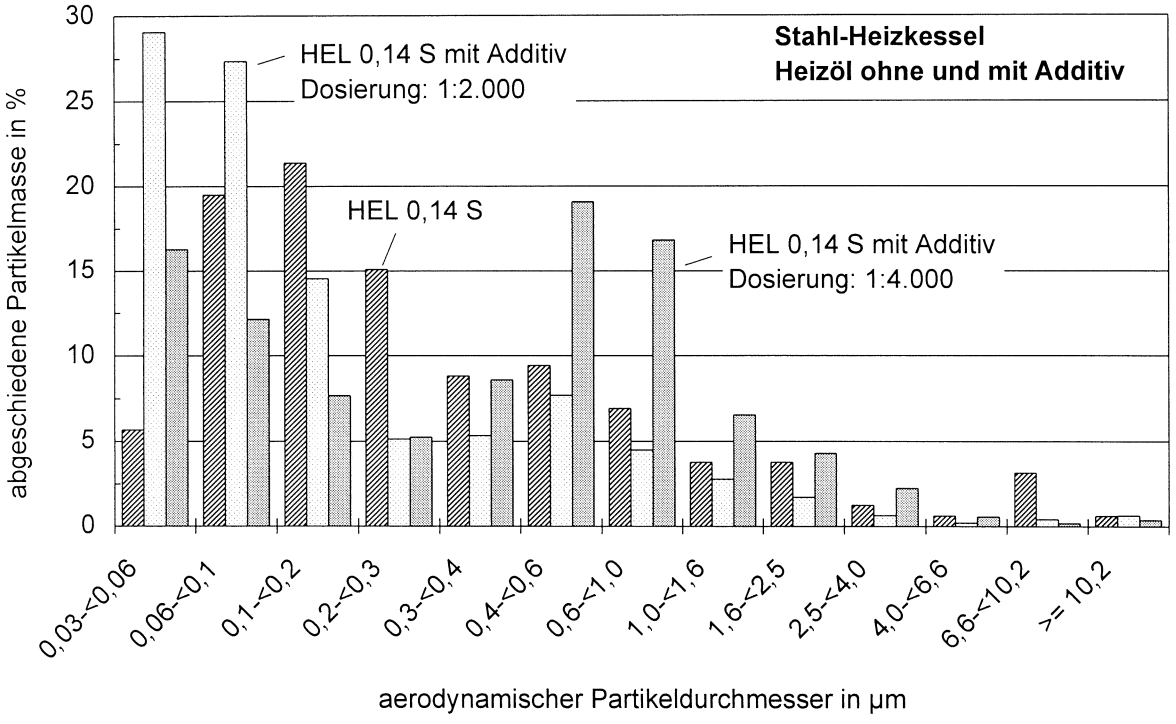


Bild 5.4: Größenverteilung der Partikel beim Stahl-Heizkessel für die Ölqualität HEL 0,14 S ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv (Dosierung: 1: 2.000 und 1:4.000)

Durch die Zugabe des ferrocenhaltigen Additivs mit dem empfohlenen Mischungsverhältnis 1:2.000 erhöht sich der Anteil der Partikel, die auf den letzten beiden Trennstufen des Impaktors (aerodynamische Durchmesser 0,03-<0,06 und 0,06-< 0,1 µm) abgeschieden werden, deutlich. Auf den übrigen Trennstufen (aerodynamische Durchmesser 0,1-< 0,2 µm bis >= 10,2 µm) nehmen dagegen die Massenanteile entsprechend ab bzw. bleiben unverändert.

Wird das Additiv in einem reduzierten Mischungsverhältnis von 1:4.000 dem Heizöl beigemischt, ergibt sich eine etwas andere Partikelverteilung. So nimmt der Anteil der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser 0,03-<0,06 µm gegenüber der Standarddosierung

zwar stark ab, liegt aber dennoch höher als beim nicht additiviertem Heizöl. Auf den übrigen Trennstufen ergeben sich bei der Dosierung 1:4.000 teils geringere und teils höhere Partikelanteile gegenüber den beiden anderen dargestellten Verteilungen. Besonders auffällig sind die hohen Anteile von Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern von 0,4-<0,6 und 0,6-<1,0 µm.

Bei der Bewertung der Größenverteilungen für die Heizölqualität 0,14 S ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv ist allerdings zu beachten, dass hier sehr unterschiedliche Partikelkonzentrationen im Abgas vorlagen. Nimmt die Partikelkonzentration insgesamt ab und zeigt sich diese Abnahme besonders auf nur wenigen Trennstufen, so führt die Darstellung der prozentualen Massenanteile der einzelnen Trennstufen über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser u.U. zu einer unvollständigen Interpretation der Ergebnisse. Deshalb sind in **Bild 5.5** die Konzentrationen der einzelnen Partikelfraktionen in Abhängigkeit der Partikelgröße dargestellt. Diese Partikelkonzentrationen wurden für jede Trennstufe aus den jeweiligen gemessenen Partikelmassen und dem Probenahmevolumen berechnet.

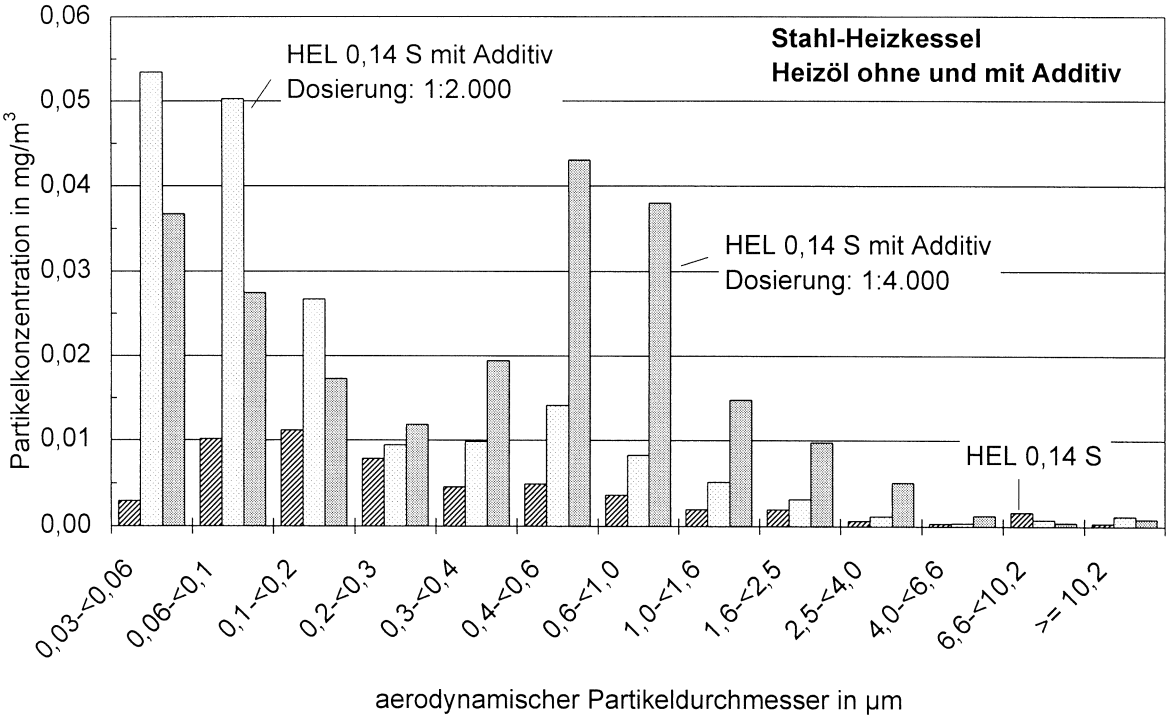


Bild 5.5: Partikelkonzentration in Abhängigkeit des aerodynamischen Partikeldurchmessers beim Stahl-Heizkessel für die Heizölqualität HEL 0,14 S ohne und mit ferrocenhaltigem Additiv (Dosierung: 1: 2.000 und 1:4.000, Partikelkonzentrationen sind bezogen auf 3 Vol% O_2)

Wird dem Heizöl ein ferrocenhaltiges Additiv beigemischt, so ergeben sich vor allem auf den letzten (Partikeldurchmesser 0,03-<0,06 und 0,06-<0,1 µm) und mittleren Trennstufen (Partikeldurchmesser 0,4-<0,6 und 0,6-<1,0 µm) des Impaktors erhöhte Partikelkonzentrationen. Bei Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern von 0,2-<0,3 und > 4,0 µm sind nur vergleichsweise geringe Konzentrationsänderungen feststellbar.

In **Tabelle 5.5** sind für den Stahl-Heizkessel die berechneten mittleren Anteile der Partikelfraktionen PM_x für den Betrieb mit Heizölen unterschiedlicher Qualität und bei der Zumischung eines ferrocenhaltigen Additivs mit zwei Mischungsverhältnissen aufgelistet.

Tabelle 5.5: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Stahl-Heizkessel bei unterschiedlichen Heizölqualitäten und bei Zugabe eines ferrocenhaltigen Additivs bei Mischungsverhältnissen 1:2.000 und 1:4.000

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Stahl-Heizkessel und Betrieb mit der Heizölqualität					
	HEL 0,14 S	HEL 0,1 S	HEL 0,05 S	HEL 0,001 S	HEL 0,14 S mit Additiv 1:2.000	HEL 0,14 S mit Additiv 1:4.000
	Rußzahl 0-1				Rußzahl ~ 0	
PM_1	86,8	78,9	60,4	75,4	93,6	85,8
$PM_{2,5}$	94,3	89,0	73,1	87,4	98,1	96,6
PM_{10}	99,2	98,7	96,5	96,7	99,3	99,6

Die ermittelten Anteile der einzelnen Partikelfraktionen sind für den Stahl-Heizkessel beim Betrieb mit den vier untersuchten Heizölqualitäten gut vergleichbar. Vor allem für die Qualitäten HEL 0,14 S, HEL 0,1 S und HEL 0,001 S ergeben sich für die Anteile der Fraktionen PM_x relativ geringe Bandbreiten. Diese reichen z.B. für PM_1 von 75,4 bis 86,8 % und für PM_{10} von 96,7 bis 99,2 %. Bei der Heizölqualität HEL 0,05 S ergaben sich, im Vergleich zu den anderen Qualitäten, bei den Partikelfraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ die geringsten Anteile. Der prozentuale Anteil von PM_{10} liegt allerdings nahezu innerhalb der Bandbreite für die drei anderen Qualitäten. Bei der Qualität HEL 0,05 S wurden für die Viskosität und den Rückstand (siehe Tabelle 4.5) die höchsten Werte der vier Brennstoffqualitäten ermittelt. Ob die Unterschiede in den Anteilen der Fraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ von den Abweichungen der Brennstoffeigenschaften verursacht werden, kann nicht beurteilt werden.

In Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses beim Additiv ergibt sich eine mehr oder weniger große Veränderung der Anteile für die Partikelfraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$. So nehmen beim Mischungsverhältnis von 1:2.000 die Anteile dieser beiden Fraktion deutlich zu. Wird das ferrocenhaltige Additiv mit reduzierter Dosierung (1:4.000) dem Heizöl beigemischt, liegt der Anteil der Partikelfraktion PM_1 innerhalb der Bandbreite bei den vier untersuchten Heizölqualitäten und der Anteil der Fraktion $PM_{2,5}$ nimmt in der Tendenz leicht zu.

5.3 Guss- und Stahl-Heizkessel im Vergleich

Im folgenden werden die Messergebnisse für H_2SO_4, NO_x und filterbare Partikel sowie die Größenverteilungen der Partikel beim Guss- und Stahlkessel gegenübergestellt. **Bild 5.6** zeigt die Konzentrationen an H_2SO_4, NO_x und filterbaren Partikeln im Abgas der beiden Heizkessel in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des verfeuerten Heizöls.

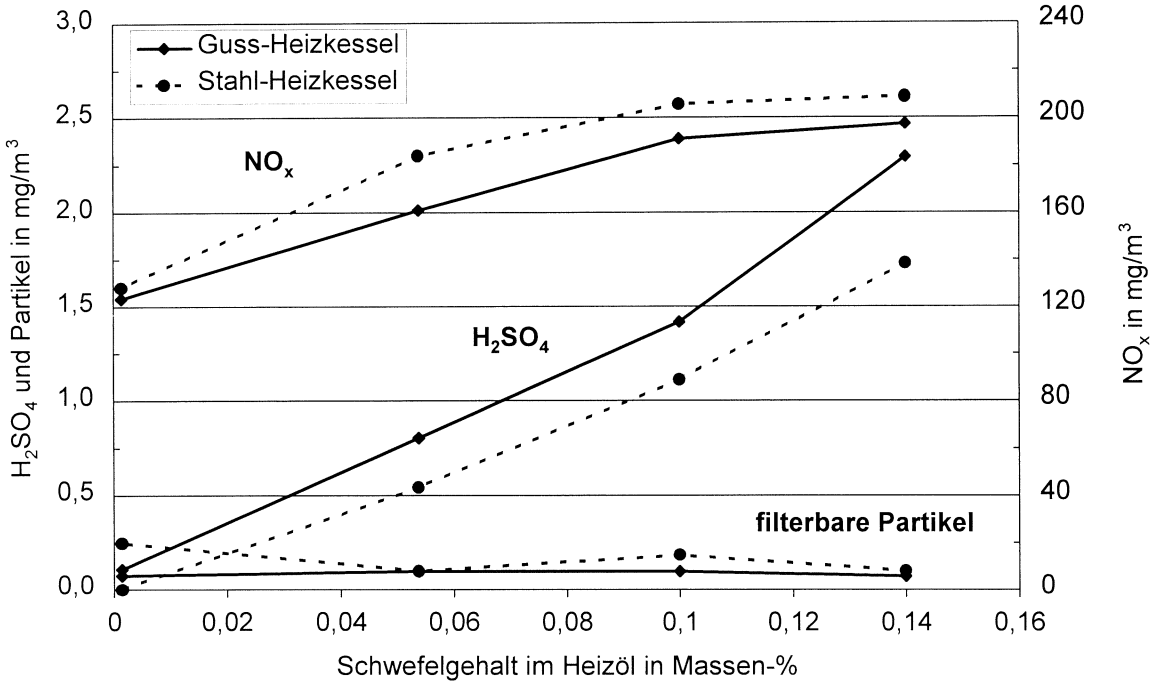


Bild 5.6: Konzentrationen an H_2SO_4, NO_x und filterbaren Partikeln im Abgas der beiden untersuchten Heizkessel in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des verfeuerten Heizöls (Konzentrationen sind auf 3 Vol% O_2 bezogen)

Mit zunehmenden Schwefel- bzw. Stickstoffgehalten im Heizöl nehmen bei beiden Heizkesseln auch die NO_x-Konzentrationen (angegeben als NO_2) zu. Beim marktüblichen Guss-Heizkessel (Neugerät) liegen die NO_x-Konzentrationen für alle untersuchten Heizölqualitäten niedriger als beim Stahl-Heizkessel (Altgerät). Die Differenz zwischen den NO_x-Konzentrationen nimmt beim weitgehend stickstofffreiem Heizöl (Qualität HEL 0,001 S) ab.

Die im Abgas der Heizkessel gemessenen H_2SO_4-Konzentrationen steigen mit zunehmendem Schwefelgehalt des Heizöls stark an. Bei dem nahezu schwefelfreien Heizöl der Qualität HEL 0,001 S wurde beim Guss-Heizkessel nur noch eine sehr geringe H_2SO_4-Konzentration von 0,11 mg/m^3 gemessen. Beim Stahl-Heizkessel war die Schwefelsäurekonzentration im Abgas so gering, dass sie mit dem eingesetzten Messverfahren nicht mehr sicher nachgewiesen werden konnte. Die Ursache für diese geringe H_2SO_4-Konzentration könnte, im Vergleich zum Guss-Heizkessel, in den veränderten Verbrennungsbedingungen (Temperatur- und Sauerstoffverteilung, Aufenthaltszeiten), der unterschiedlichen Kesselkonstruktion (Kesselmaterial, Führung der Heizgase) und einem gewissen Adsorptionsvermögen des Heizgas-Umlenkschirms liegen. Beim marktüblichen Heizöl mit einem Schwefelgehalt von 0,14 Massen-% nahmen die H_2SO_4-Konzentrationen zu und betrugen für den Guss- bzw. Stahl-Heizkessel 2,29 bzw. 1,73 mg/m^3 (Angaben jeweils bezogen auf 3 Vol% O_2).

Die Konzentration der filterbaren Partikel zeigt keine Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Brennstoffes. Die geringen Unterschiede in den Konzentrationen beim Stahl-Heizkessel ergaben sich durch das nicht vollständig stabile Betriebsverhalten des Brenners, der auf Ände-

rungen der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck) besonders empfindlich reagiert. Dies führt zu Schwankungen der gemessenen Rußzahlen und Partikelkonzentrationen (filterbare Anteile).

Insgesamt wird deutlich, dass bei höheren Schwefelgehalten im Brennstoff die Partikelemissionen (als Summe aus filter- und kondensierbaren Anteilen) der Heizkessel nahezu ausschließlich von den Schwefelsäureemissionen bestimmt werden. Der Anteil der filterbaren Partikel liegt z.B. bei der Ölqualität HEL 0,14 S im Mittel für beide Heizkessel bei lediglich rund 4 %. Bei abnehmenden Schwefelgehalten im Heizöl nimmt der Anteil der filterbaren Partikelemissionen an der Gesamtemission immer mehr zu, so dass bei der Ölqualität 0,001 S die filterbaren Partikelemissionen bereits rund 40 (beim Guss-Heizkessel) bzw. fast 100 % (beim Stahl-Heizkessel) der gesamten Partikelemissionen verursachen.

In **Tabelle 5.6** sind für den Guss- und Stahl-Heizkessel die bei den verschiedenen Heizölen ermittelten Partikelkonzentrationen, die Anteile der filter- und kondensierbaren Partikel und die SO_3-Bildungsraten aufgelistet.

Tabelle 5.6: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Stahl-Heizkessel bei unterschiedlichen Heizölqualitäten und bei Zugabe eines ferrocenhaltigen Additivs bei Mischungsverhältnissen 1:2.000 und 1:4.000

Guss-Heizkessel (GH) Stahl-Heizkessel (SH)	Heizölqualität							
	HEL 0,14 S		HEL 0,1 S		HEL 0,05 S		HEL 0,001 S	
	GH	SH	GH	SH	GH	SH	GH	SH
Partikelkonzentration insgesamt (filter- und kondensierbare Anteile) in mg/m³ bei 3 Vol% O_2	2,37	1,83	1,51	1,30	0,90	0,64	0,18	0,25
hiervon:								
filterbare Partikel in %	*3,1*	*5,5*	*6,4*	*14,3*	*10,8*	*15,6*	*40,5*	*~ 100*
Kondensierbare Partikel in %	*96,9*	*94,5*	*93,6*	*85,7*	*89,2*	*84,4*	*59,5*	*~ 0*
SO_3-Bildungsrate in %	0,8	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	3,8	~ 0

In **Bild 5.7** sind für den Guss- und Stahl-Heizkessel die mit dem Impaktor gemessenen Größenverteilungen der Partikel für die Heizölqualitäten HEL 0,14 S und HEL 0,001 S im Vergleich dargestellt.

Beim Vergleich der Größenverteilungen der Partikel für den Guss- und Stahl-Heizkessel zeigen sich für einige Partikeldurchmesser deutliche Unterschiede der anteiligen Partikelmassen. So sind beim Stahl-Heizkessel vor allem auf den letzten drei Trennstufen des Impaktors (Partikeldurchmesser 0,03-<0,06 bis 0,1-<0,2 µm) bei beiden dargestellten Ölqualitäten geringfügig bzw. deutlich höhere Anteile vorhanden als beim Guss-Heizkessel. Für die Heizölqualität HEL 0,14 S trifft dies auch noch für Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von 0,2-<0,3 µm zu.

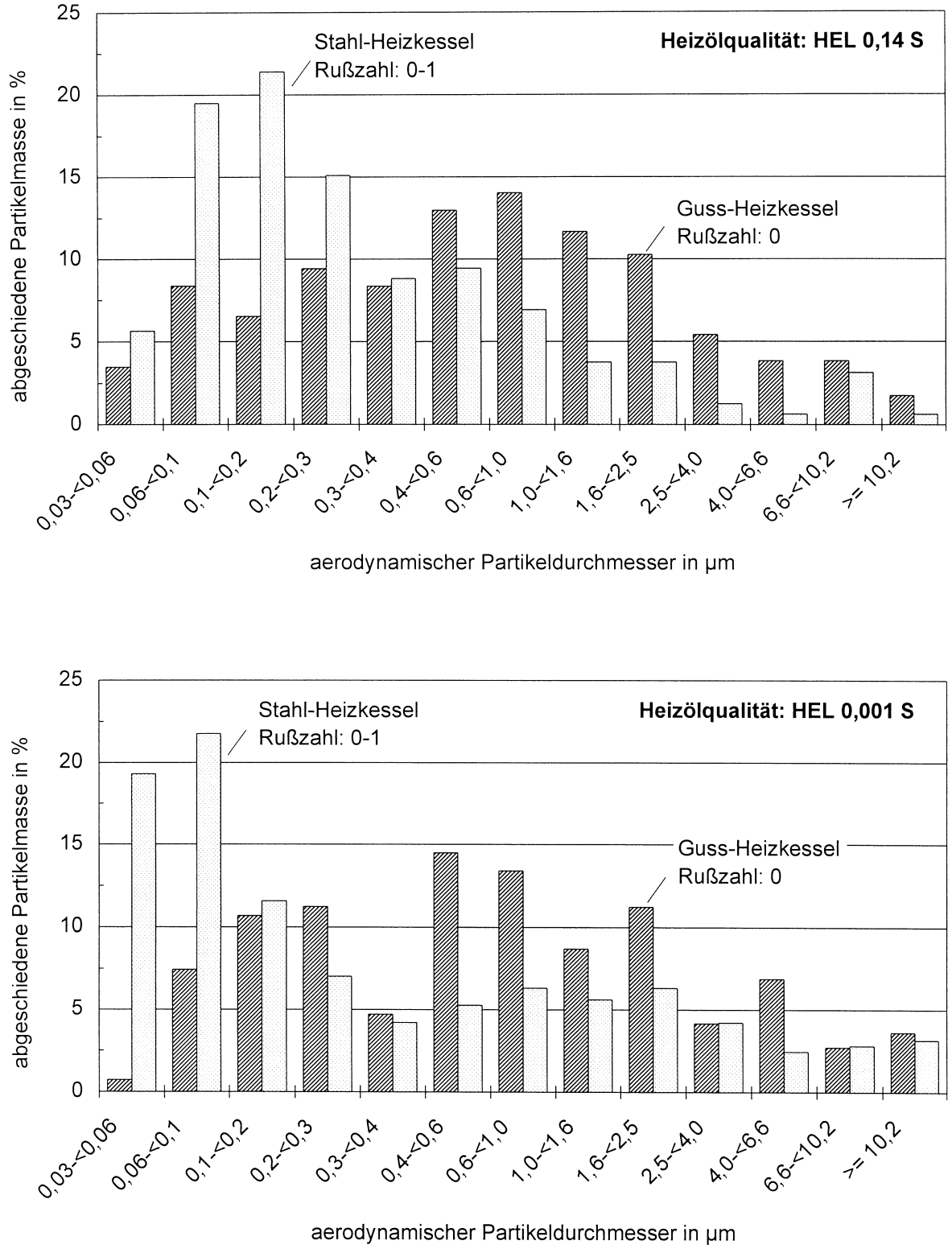


Bild 5.7: Größenverteilung der Partikel beim Guss- und Stahl-Heizkessel für die Heizölqualitäten HEL 0,14 S und HEL 0,001 S

Im Vergleich zum Stahl-Kessel wurden beim Guss-Heizkessel auf den mittleren Trennstufen des Impaktors (Partikeldurchmesser 0,4-<0,6 bis 1,6-<2,5 µm) bei beiden Ölqualitäten deutlich höhere Partikelanteile im Abgas gemessen. Diese Unterschiede in der Größenverteilung der Partikel bei den beiden Heizkesseln zeigt sich auch teilweise bei den Anteilen der Partikelfraktionen PM_x, die in **Tabelle 5.7** aufgelistet sind.

Tabelle 5.7: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für den Guss- und Stahl-Heizkessel im Vergleich für zwei Heizölqualitäten

Partikel-fraktion	Anteil der Partikelfraktion in % beim Guss- und Stahl-Heizkessel und Betrieb mit der Heizölqualität			
	HEL 0,14 S		HEL 0,001 S	
	Guss-Heizkessel	Stahl-Heizkessel	Guss-Heizkessel	Stahl-Heizkessel
PM_1	63,2	86,8	62,7	75,4
$PM_{2,5}$	85,1	94,3	82,6	87,4
PM_{10}	98,0	99,2	96,2	96,7

5.4 Ergebnisse der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse

Zur Ermittlung von wichtigen Partikelinhaltsstoffen wurde die Röntgen-Fluoreszenz-Analyse bei ausgewählten Filtersubstraten des Planfilterkopfgerätes angewendet. Analysiert wurde ein unbelegter Filter zur Ermittlung der Blindwerte und jeweils ein beprobter Filter bei den Versuchen mit der Heizölqualität HEL 0,14 S ohne ferrocenhaltiges Additiv und mit Additiv bei Dosierungen 1:4.000 (reduzierte Dosierung) und 1:2.000 (empfohlene Dosierung). In **Tabelle 5.8** sind die wichtigsten analysierten Elemente und ihr prozentualer Massenanteil (berechnet als Oxide und bezogen auf die gesamte Filtermasse) dargestellt.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse für beim Stahl-Heizkessel beprobte Filtersubstrate des Planfilterkopfgerätes

Element	Anteil der Elemente (als Oxide) in Massen-% für			
	unbelegte Filter (Blindwerte)	HEL 0,14 S ohne Additiv	HEL 0,14 S mit Additiv 1:4.000	HEL 0,14 S mit Additiv 1:2.000
Si	99,73	99,35	99,10	98,70
Na	0,05	0,08	0,05	0,07
Ca	0,10	0,16	0,12	0,15
K	0,01	0,03	0,02	0,02
Fe	0,02	0,03	0,38	0,81
S	0,03	0,25	0,24	0,17
Cu	0,004	0,01	0,009	0,01
Zn	0,003	0,007	0,009	0,008
Cr	0,003	0,005	0,005	0,003

Silizium (Si), Natrium (Na), Calcium (Ca) und Kalium (K) sind Bestandteile von technischen Silicaten und damit der Quarzglasfilter. Deren Anteile ändern sich praktisch nicht. Da die aufgeführten Massenanteile auf die jeweilige Gesamtfiltermasse bezogen ist, verändern sich die Anteile geringfügig, wenn die Anteile einzelner Elemente etwas stärker zu oder abnehmen. Dies ist bei den Versuchen mit Heizöladditiv der Fall. Hier nimmt der Anteil von Eisen (Fe) im belegten Filter deutlich zu. Auf dem unbelegten und dem mit Abgas bei der reinen Heizölverbrennung belegten Filter wurden, aufgrund von Verunreinigungen des Filtermaterials, geringe Eisenanteile in Höhe von ca. 0,02 Massen-% ermittelt. Proportional zur Dosierung des ferrocenhaltigen Additivs nimmt der Anteil von Fe auf den belegten Filtern zu und erreichen 0,38 bzw. 0,81 Massen-%. Bei den übrigen aufgeführten Elementen findet praktisch keine Konzentrationsänderungen statt, wodurch deren prozentualen Anteile leicht abnehmen.

Die Anteile von Schwefeloxiden (S) sind auf den belegten Filtern, gegenüber den Filterblindwerten, merklich höher und für alle Verbrennungsversuche vergleichbar. Oxide von Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Chrom (Cr) sind als Verunreinigungen bereits in geringen Anteilen im unbelegten Filter nachweisbar. Auf den beprobten Filtersubstraten ist bei Cu und Zn in der Tendenz eine geringe Zunahme der Massenanteile erkennbar. Vermutlich stammen diese Metalle aus Bauteilen des Kessels oder Brenners bzw. der Ölleitung (Kupferleitung). Ob der Kupfergehalt des Heizöls durch den Raffinerieprozess beeinflusst wurde, kann hier nicht beurteilt werden.

6 Zusammengefasste Ergebnisse

Mit den Messergebnissen sollen für Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, die im Bereich der Haushalte und bei Kleinverbrauchern mit Heizöl EL betrieben werden, neue Emissionsfaktoren ermittelt und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln berechnet werden. Deshalb lag ein besonderer Schwerpunkt in diesem Vorhaben in der Durchführung von Emissionsmessungen. Diese Messungen sind Grundlage zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10}. Sind im Heizöl Schwefelverbindungen vorhanden, aus denen sich zuerst SO_3 und im abkühlenden Heizgas dann dampfförmige Schwefelsäure bildet, ist zwischen filterbaren und kondensierbaren Anteilen an der Partikelemission zu unterscheiden. Um auch die kondensierbaren Anteile in Form von H_2SO_4 zu erfassen, wurde die Schwefelsäurekonzentration im Abgas gemessen. Der Anteil der filterbaren Partikelemission wurde mit einem Filterkopfgerät gravimetrisch ermittelt, die Probenahme fand hierbei im unverdünnten Abgas statt.

Stellvertretend für den Bestand an Heizkesseln mit Ölgebläsebrennern in Deutschland wurde ein marktüblicher Guss-Heizkessel mit gelbbrennendem Ölgebläsebrenner (Neugerät) und ein älterer Stahl-Heizkessel mit Gelbbrenner (Altgerät) für die Partikelmessungen verwendet. Die Messungen wurden im stationären Dauerbetrieb der Heizkessel beim Einsatz unterschiedlicher Heizölqualitäten und Brennereinstellungen durchgeführt.

Es wurden Heizölqualitäten mit Schwefelgehalten von 0,14 (marktübliche Qualität), 0,1, 0,05 und 0,001 Massen-% eingesetzt. Die Ölbrenner wurden in der Regel nach Herstellerangaben mit Rußzahlen von 0 (Neugerät) bzw. 0-1 (Altgerät) betrieben. Bei jedem Heizkessel wurde eine Messreihe auch mit einer höheren Rußzahl durchgeführt. Beim Altgerät wurde zusätzlich der Einfluss eines ferrocenhaltigen Additivs (Verbrennungsverbesserer) auf die Partikelemissionen untersucht. Das Additiv wurde in zwei Mischungsverhältnissen, wie vom Hersteller empfohlen mit 1:2.000 und in einer reduzierten Dosierung 1:4.000, dem marktüblichen Heizöl zugemischt.

Bei den definierten Prüfstandsbedingungen und beim stationärem Dauerbetrieb wurden im Abgas der moderner Ölfeuerungen nur sehr geringe Rußkonzentrationen ermittelt. In diesen Fällen hatte sich durch Zugabe des ferrocenhaltige Additivs in das Heizöl die Partikelkonzentrationen im Abgas erhöht. Bei installierten Anlagen, wo der Wartungszustand und die Brennereinstellung mangelhaft sein kann, die Betriebsbedingungen mehr oder weniger großen Schwankungen unterliegen und beim praxisüblichen Ein-Aus-Betrieb kann sich eine andere Bewertung ergeben.

Aufgrund der ungenügenden Datenbasis können allerdings für die Brennereinstellungen mit erhöhter Rußzahl und für die Versuche mit dem Heizöladditiv weder Emissionsfaktoren noch das Emissionsaufkommen für Partikel berechnet werden. So sind vor allem keine Angaben vorhanden, mit denen die Betriebszeiten mit erhöhter Rußzahl bzw. mit Einsatz von ferrocenhaltigen Additiven abgeleitet werden könnten. Diese sind aber notwendig, um den Energieverbrauch dieser Feuerungen zu ermitteln. Außerdem sind keine Untersuchungsergebnisse veröffentlicht, aus denen sich für installierte Anlagenkollektive die Unterschiede in den Partikelemissionen beim Einsatz von Verbrennungsverbesserern, im Vergleich zu nicht additiviertem Heizöl ableiten lässt.

Bei den untersuchten Heizölqualitäten mit verschiedenen Schwefelgehalten zeigte sich, dass die Partikelemissionen (als Summe aus filter- und kondensierbaren Anteilen) der Heizkessel vom Schwefelgehalt im Heizöl abhängen. Mit zunehmendem Schwefelgehalt nimmt auch die Partikelemission deutlich zu. Dieser Anstieg wird von der Schwefelsäureemission und damit dem kondensierbaren Anteil der Partikelemission bestimmt. Die Konzentration der filterbaren Partikel zeigt keine Abhängigkeit vom Schwefelgehalt des Brennstoffes.

In **Tabelle 6.1** sind die Anteile der Partikelfraktionen nochmals zusammengefasst dargestellt, die aus Kapitel 5 zur Berechnung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x der Ölfeuerungen im Hauptteil des Endberichtes übernommen werden. Angegeben sind die mit dem Impaktor ermittelten Anteile der Partikelfraktionen PM_x, die nur die filterbaren Partikel umfassen. Die kondensierbaren Partikel, diese bestehen aus H_2SO_4, wurde ohne Größenfraktionierung ermittelt. Damit nun für die gesamte Partikelemission (filter- und kondensierbare Partikel) bei Ölfeuerungen die Anteile der Partikelfraktionen PM_x angegeben werden können, wurde eine Neuberechnung dieser Anteile unter Einbeziehung der kondensierbaren Partikel vorgenommen.

Tabelle 6.1: Mittlere Anteile der Partikelfraktionen PM_x an der im Impaktor gesammelten Partikelmasse für Ölfeuerungen (Heizöl EL) im Geltungsbereich der 1. BImSchV

Heizkessel mit Ölgebläse-brennern	Schwefelgehalt des Heizöls in Massen-%	Anteil der Partikelfraktion PM_x [1] in % für								
		filterbare Partikel [2]			kondensierbare Partikel [3]			filter- und kondensierbare Partikel [4]		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Altgeräte (Baujahre vor 1990)	0,14 (marktüblich)	86,8	94,3	99,2	85	100	100	85,1	99,7	100
	0,1	78,9	89,0	98,7				84,1	98,4	99,8
	0,05	60,4	73,1	96,5				81,2	95,8	99,4
	0,001	75,4	87,4	96,7				75,4	87,4	96,7
Neugeräte (Baujahre nach 1991)	0,14 (marktüblich)	63,2	85,1	98,0				84,3	99,5	99,9
	0,001	62,7	82,6	96,2				76,0	93,0	98,5

[1] die Anteile der Partikelfraktionen gelten für den stationären Dauerbetrieb der Feuerungen bei Nennwärmeleistung und einer Brennereinstellung nach Herstellerangaben
[2] mit dem Impaktor ermittelte Anteile der Partikelfraktionen
[3] abgeschätzte Anteile der Partikelfraktionen für kondensierte Schwefelsäure
[4] mit Massenanteilen für filterbare und kondensierbare Partikel neu berechnete Partikelfraktionen

Nach z.B. Böhm (1990) und Corio et al. (2000) ist davon auszugehen, dass in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle die kondensierte Schwefelsäure zum überwiegenden Teil aus Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von < 2,5 µm besteht. Ein wesentlicher Anteil hiervon besitzt sogar Durchmessern von < 0,5 µm. Deshalb wurde für die Neuberechnung der Partikelfraktionen PM_x angenommen, dass 100 % der kondensierten Schwefelsäure aerodynamische Partikeldurchmesser von <= 2,5 µm und 85 % von <= 1 µm aufweisen. Die neuberechneten Werte ergeben sich durch eine Gewichtung der Partikelfraktionen PM_x mit den entsprechenden Massenanteilen für mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte filterbare Partikel und nach dem Shell-Verfahren gemessene kondensierbare (H_2SO_4) Partikel.

Durch den hohen Anteil von kondensierbaren Partikeln, die zum überwiegenden Anteil der Partikelfraktion PM_1 zugerechnet werden, verwischen sich bei Heizölen mit höheren Schwefelgehalten die gerätebedingten Unterscheide für die zusammengefassten Partikelfraktionen der filter- und kondensierbaren Partikel. Nur beim weitgehend entschwefelten Heizöl zeigen sich zwischen den beiden untersuchten Heizkesseln wieder etwas größere Unterschiede.

Insgesamt nehmen bei beiden Heizkesseln für die filter- und kondensierbaren Partikel die Anteile der Fraktion PM_1 und $PM_{2,5}$ mit abnehmendem Schwefelgehalt im Brennstoff bzw. abnehmender H_2SO_4-Konzentration im Abgas, ebenfalls ab. Die Anteile der Partikelfraktion PM_{10} bleiben nahezu unverändert im Bereich von 96,7 bis 100 %.

7 Literatur

1. BImSchV. 2001.
Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

Baumgärtner, K.J. 1993.
Partikelemissionen aus Leichtölfeuerungen - Charakterisierung und Verminderung. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 105, VDI Verlag Düsseldorf.

Böhm, R. 1990.
Entwicklung und Erprobung eines Messinstruments zur quasikontinuierlichen Erfassung von Schwefelsäure und schwefelhaltigen Partikeln im Umgebungsluft. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 73, VDI Verlag Düsseldorf.

Briel, H. 1995.
Schwefeltrioxidmessung in Rauchgasen. Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik. Technische Universität Graz.

Chory, J.P. 1962.
Methode zur quantitativen Bestimmung von SO3 und SO2 in Rauchgasen. BWK Nr. 12, S. 601-603.

Corio L.A. und Sherwell, J. 2000.
In stack condensible particulate matter measurement and issues, Air & Waste Manag. Assoc., Vol. 50, S. 207-218.

Dreizler, D. 2001.
Ermittlung der Partikelemissionen von mit Heizöl EL betriebenen Ölfeuerungen. Diplomarbeit Nr. 2692, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart.

Franzen, H. und Fißan, H.-J: (1981).
Kaskadenimpaktoreinsatz im heißen Abgas einer Ölfeuerung. Staub-Reinhalt. Luft, Nr. 1, S. 22-26.

Hoenig, V. 1991.
Untersuchung der Wirkungsmechanismen von Additiven für schweres Heizöl. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 84, VDI Verlag, Düsseldorf.

Hornig, M., Jungbluth, H., Pfeil, A. und Weiser, V. 1997.
Additive optimieren Ölfeuerungen. Wärmetechnik, Nr. 2, S. 85-88.

Hornig, M., Lohmann, G. 1998.
Heizöl und Additive... . Sonderdruck aus: Haustechnik IKZ, Heft 14.

Hornig, M. 2001.
Persönliche Mitteilung über die Wirksamkeit von Ferrocen bei unterschiedlichen Dosierraten. Octel Deutschland GmbH, Herne.

Hüglin, Ch. 2000.
Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2,5-Imissionen. Chemische Zusammensetzung des Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell. Bericht C4 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-Bern.

IWO. 2000.
Informationsschriften der Reihe IWO Technik. Institut für wirtschaftliche Ölheizung e.V., Hamburg.

Jungbluth, H. und Lohmann, G. 1999.
Ferrocen als Additiv für Mineralölprodukte. Nachr.Chem.Tech.Lab., Nr. 5, S. 532-536.

Koebel, M. und Elsener, M. 1987.
Korrosion von ölgefeuerten Zentralheizkesseln: Durch saure Verbrennungsprodukte des Brennstoffschwefels. Wärmetechnik Nr. 1, S. 9-16.

Mohr, M., Schmatloch, V. und. Zaug, H.P. (2000).
Investigation of Fine Particle Emissions of small Oil Fired Burners. Proceedings of 'Second European Conference on Small Burner and Heating Technology', March 16-17, Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik, IKE, Universität Stuttgart.

Pfeiffer, F., Struschka, M. und Baumbach, G. 2000.
Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 14-00, Umweltbundesamt, Berlin.

RAL-UZ 9 und RAL UZ 46. 1999.
Grundlage für die Umweltzeichenvergabe. Vergabegrundlagen für das Umweltzeichen für emissionsarme Ölzerstäubungsbrenner (RAL-UZ 9) und Ölbrenner-Kessel-Kombinationen (Units) (RAL-UZ 46). RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Sankt Augustin.

RWTÜV. 1998.
Untersuchungsbericht Teil I. Langzeituntersuchung des SAT-Heizöladditivs 2819. RWTÜV Anlagentechnik, Essen.

Schmidt, H.-J. 1987.
Schwefeltrioxidbestimmung in Rauchgasen eines Ölkraftwerkes. Diplomarbeit im Fachgebiet Luftreinhaltung, Institut für technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin.

Shell. 1968.
Bestimmung des SO3- und SO2-Gehaltes in Rauchgasen. Deutsche Shell AG, MTW1, 22. Oktober 1968.

Struschka, M. und Baumbach, G. 1986.
Messtechnik für die Säuretaupunktmessung in Feuerungsabgasen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 19, Nr. 2, VDI Verlag, Düsseldorf.

Struschka, M., Pfeiffer, F., von Lepel, F. und Baumbach, G. 2000.
Start- und Stoppemissionen von Öl- und Gasfeuerungen. Erdöl Erdgas Kohle, Heft 3, S. 121-122.

VDI 2066.
Blätter 1 und 7: Messen von Partikeln. VDI Handbuch Reinhaltung der Luft. Beuth Verlag, Berlin, jeweils aktuellste Fassung.

VDI 3491, Blatt 1. 1980.
Messen von Partikeln. Kennzeichnung von Partikeldispersionen in Gasen. Begriffe und Definitionen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

8 Fotoanhang

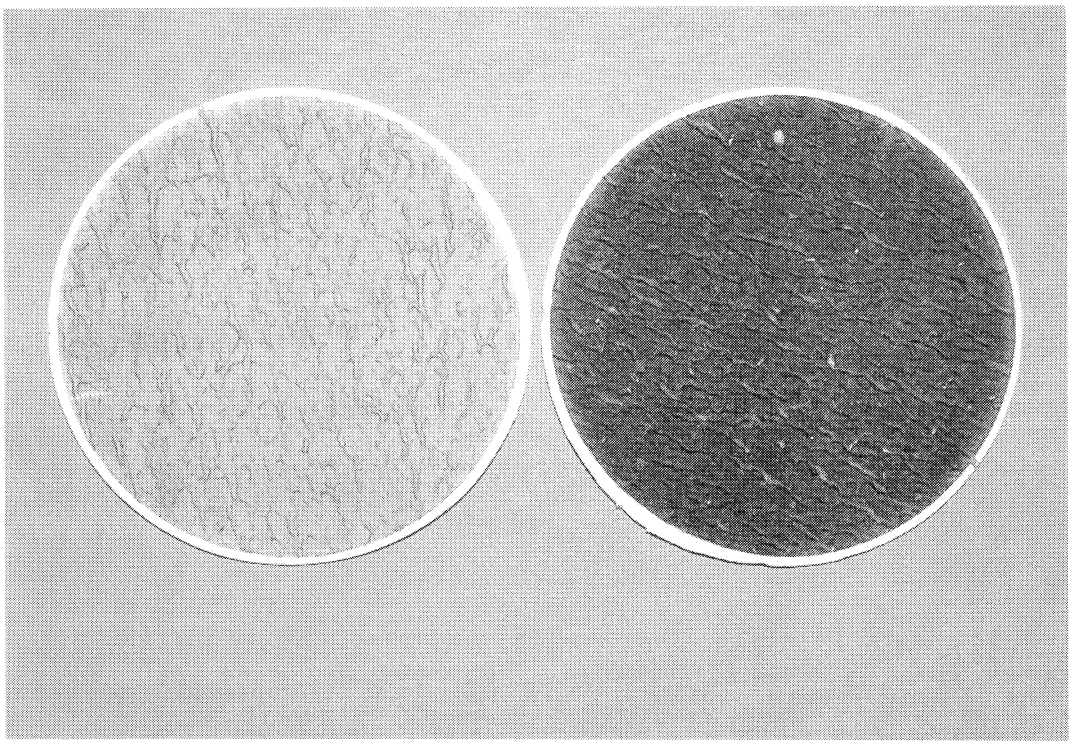


Foto A1: Filtersubstrate des Planfilterkopfgerätes. Probenahme beim Stahl-Heizkessel (Altgerät) bei Verbrennung von Heizölqualität HEL 0,14 S
links: mit ferrocenhaltigem Additiv und Dosierung 1:2.000 (Filtermasse: 3,02 mg, Probenahmevolumen: 5,46 m³)
rechts: ohne Additiv (Filtermasse: 0,67 mg, Probenahmevolumen: 5,56 m³)

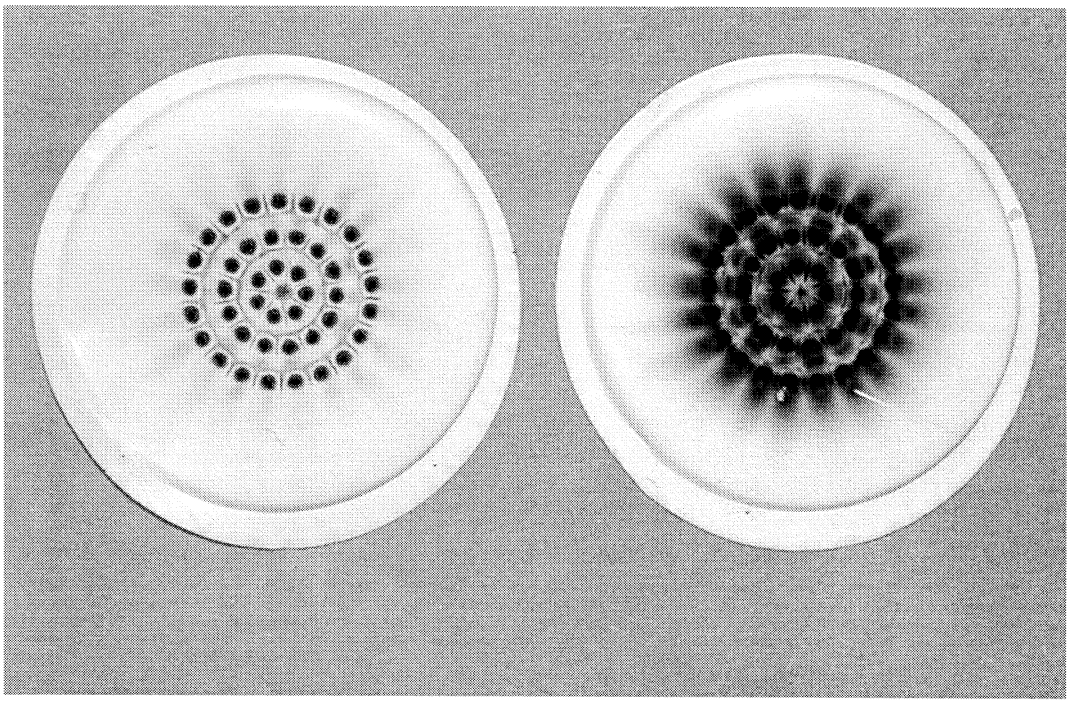


Foto A2: Filtersubstrate des Niederdruck-Impaktors (LPI), Stufe 3. Probenahme beim Stahl-Heizkessel (Altgerät) bei Verbrennung von Heizölqualität HEL 0,14 S
links: mit ferrocenhaltigem Additiv und Dosierung 1:2.000 (Filtermasse: 0,68 mg)
rechts: ohne Additiv (Filtermasse: 0,34 mg)

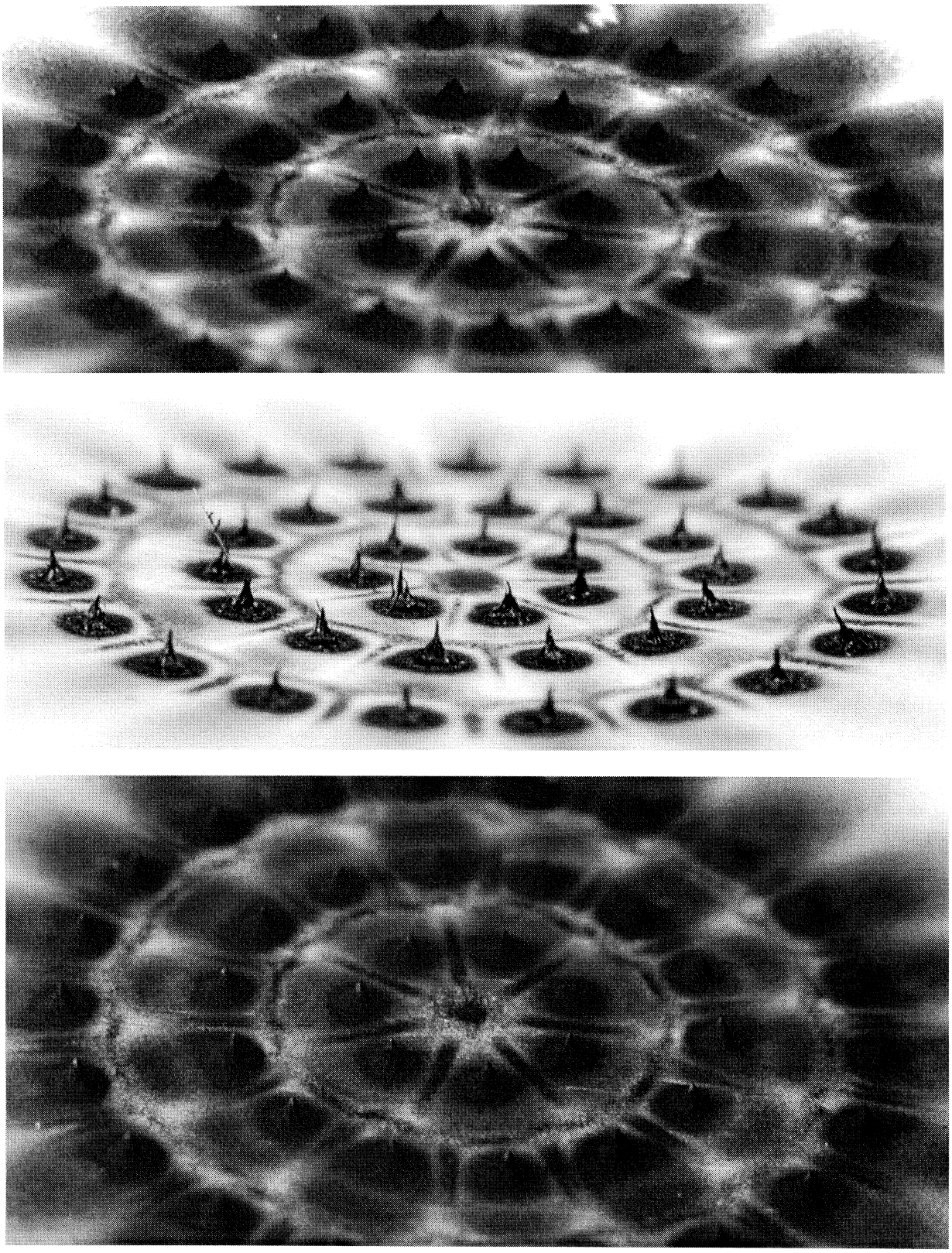


Foto A3: Filtersubstrate des Niederdruck-Impaktors (LPI), Stufe 3. Probenahme beim Stahl-Heizkessel (Altgerät) bei Verbrennung von Heizölqualität HEL 0,14 S
oben: ohne Additiv
mittig: mit ferrocenhaltigem Additiv und Dosierung 1:2.000
unten: ohne Additiv (Filtermasse: 0,34 mg)

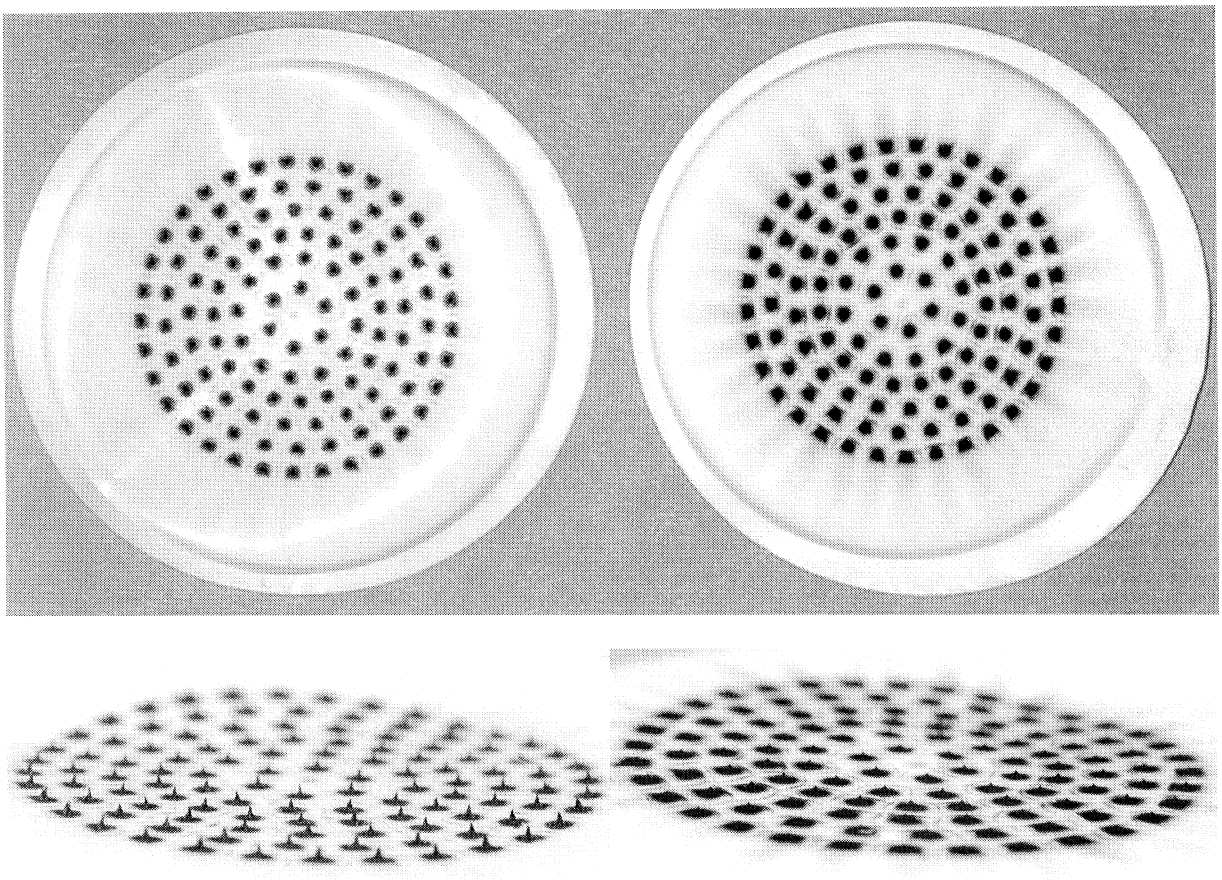


Foto A4: Filtersubstrate des Niederdruck-Impaktors (LPI), Stufe 2. Probenahme beim Stahl-Heizkessel (Altgerät) bei Verbrennung von Heizölqualität HEL 0,14 S
links: mit ferrocenhaltigem Additiv und Dosierung 1:2.000 (Filtermasse: 1,28 mg)
rechts: ohne Additiv (Filtermasse: 0,31 mg)

Teil III: Heizkessel für Holzbrennstoffe

Die Bearbeitung von Teil III erfolgte durch:

Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik

der Technischen Universität München – Weihenstephan

(Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE) H. Schön)

Dr. Hans Hartmann

Volker Schmid (Dipl.-Ing. FH)

Heiner Link (Dipl.-Ing. FH)

Bayerische Landesanstalt für Landtechnik

Abteilung Technologie Nachwachsender Rohstoffe (Dr. A. Strehler)

Arbeitsgruppe Festbrennstoffe (Dr. Hans Hartmann)

Vöttinger Straße 36, D-85354 Freising-Weihenstephan, Germany

Tel. 08161-71-3303, Fax.: 08161-71-4048

Internet: http://www.tec.agrar.tu-muenchen.de

Inhaltsverzeichnis

Seite:

1 Einleitung ... 204

2 Zielsetzung ... 206

3 Methodisches Vorgehen ... 208

3.1 Versuchsprogramm (Übersicht) ... 208

3.2 Beschreibung der Feuerungsanlagen ... 209

3.2.1 Stückholzkessel "modern" ... 210

3.2.2 Stückholzkessel "alte Technik" ... 212

3.2.3 Hackgutkessel ... 214

3.2.4 Pelletkessel ... 216

3.3 Versuchsbrennstoffe ... 217

3.4 Versuchsaufbau und Messanordnung ... 218

3.5 Mess- und Analyseverfahren ... 219

3.5.1 Feuerungs- und Emissionsmessgrößen ... 219

3.5.2 Brennstoffparameter ... 225

3.6 Versuchsdurchführung ... 226

3.6.1 Inbetriebnahme und Vorversuche ... 226

3.6.2 Durchführung der Verbrennungsversuche ... 226

3.7 Auswertung der Abgas- und Feinstaubuntersuchungen ... 228

3.7.1 Abgas ... 228

3.7.2 Feinstaub und Gesamtstaub ... 229

3.7.3 Brennstoffe ... 230

4 Ergebnisse und Diskussion ... 231

4.1 Einfluss auf Standardemissionsgrößen (CO, VOC, Gesamtstaub) ... 231

4.1.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss ... 232

4.1.2 Entwicklungsstand ... 234

4.1.3 Brennstoffwassergehalt ... 235

4.2 Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung der Staubemission ... 236

4.2.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss ... 237

4.2.2 Entwicklungstand ... 240

4.2.3 Brennstoffwassergehalt ... 241

5 Zusammenfassung ... 243

6 Quellenverzeichnis ... 245

7 Anhang 248

7.1 Versuchsergebnisse 248

7.1.1 Stückholzkessel "modern" 248

7.1.2 Stückholzkessel "alte Technik" 252

7.1.3 Hackgutkessel, w=15% 255

7.1.4 Hackgutkessel, w=35% 259

7.1.5 Pelletkessel 263

7.2 NO_x-Emissionen und Wirkungsgrade 267

7.3 Abgasemissionen 268

7.4 Trenndurchmesser und relative Massenanteile – Impaktor 270

7.5 Randbedingungen bei der Partikelprobenahme 272

7.5.1 Parameter der Feinstaubprobenahme - Impaktor 272

7.5.2 Parameter der Gesamtstaubprobenahme - Filterkopfgerät 274

7.5.3 Filterkonditionierung bei der Gesamt- und Feinstaubprobenahme 276

1 Einleitung

Zu den wesentlichen Emissionskenngrößen von Holzfeuerungen zählt der Partikelausstoß. Im Vergleich zu den fossilen Energieträgern Erdgas oder Heizöl ist bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen im häuslichen Bereich mit einigen Nachteilen zu rechnen. Das gilt vor allem für die Verwendung von Brennstoffen mit hohem Aschegehalt wie zum Beispiel Stroh /26/; aber auch bei naturbelassenen Holzbrennstoffen kann es zu kritischen Emissionen kommen, insbesondere wenn der Aschegehalt des Brennstoffs beispielsweise aufgrund eines hohen Rindenanteils relativ hoch ist. Aschearmer Brennstoff wird dagegen verwendet, wenn es sich um Holzpellets nach Önorm M7135 /32/ oder DIN 51 731 /8/ handelt, da dieser Brennstoff in der Regel aus entrindeten Holzrückständen hergestellt wird.

Neben dem eigentlichen Gesamtstaubausstoß ist aber auch die Qualität der emittierten Partikel von besonderer Bedeutung. Dabei kann es sich nicht nur um Feststoffteilchen sondern auch um flüssige Stoffe handeln, die z. B. aus der Kondensation langkettiger Kohlenwasserstoffe (Teere) während der Verbrennung stammen. Man bezeichnet solchermaßen verunreinigte Gase auch als Aerosole, d. h. es handelt sich um mit festen oder flüssigen Stoffen angereicherte Gase, welche die Stoffteilchen über längere Zeit in der Schwebe halten können. Die Gesamtmasse von Aerosolpartikeln wird auch als partikuläre Materie (Particulate matter, PM) bezeichnet.

In der Umgebungsluft befinden sich Partikel von etwa 0,01 µm bis über 50 µm Durchmesser /5/. Als "Feinstaub" werden die Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser (d_{ae}) von weniger als 10 µm bezeichnet; unterhalb von 1 µm beginnt der sogenannte Submikronbereich der Partikelgrößen. Für Mensch und Tier sind vor allem die lungengängigen Partikel von Bedeutung; sie werden mit der Atemluft eingeatmet und dringen je nach ihrer Größe und je nach Art der Atmung unterschiedlich weit ein. Während Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von mehr als 10 µm in der Nase und im Rachenraum fast vollständig zurückgehalten werden, gelangen Teilchen kleiner als etwa 1 µm zu einem Großteil in den Bereich der Alveolen und können im Lungengewebe eingelagert werden. Aufgrund des hohen Abscheidegrads von submikronen Partikeln im Lungentrakt werden Partikel < 1 µm auch als lungengängig bezeichnet /37/.

Lungengängige feste oder flüssige Partikel aus Verbrennungsprozessen gelten als besonders schädlich, da sie auf der Oberfläche adsorbierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle mit sich führen können. Feine Ruß- und Aschepartikel erfüllen somit eine Transportfunktion für Schadstoffe und können daher teilweise reizend, toxisch und mutagen wirken /23/ /36/. Von besonderer Bedeutung sind dabei einige polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die ein kanzerogenes Potential aufweisen wie z. B. Benzo(a)Pyren (BaP).

Derartige gesundheitsgefährdende submikrone Partikel der Luft stammen zu einem großen Teil aus Verbrennungsprozessen, daher kommt dieser Emissionsquelle bei der

Reinhaltung der Luft besondere Beachtung zu. Für biogene Brennstoffe in Kleinanlagen gilt das aufgrund des kaum vermeidbaren Staubausstoßes umso mehr.

Aus diesem Grund wurden bereits in der Vergangenheit einige Untersuchungen zur Problematik der Feinstäube aus Biomassefeuerungen durchgeführt. Sie zeigen, dass für die Partikel, die bei den üblichen Verbrennungsbedingungen und Einsatzbrennstoffen aus automatisch beschickten Holzfeuerungen freigesetzt werden, meist eine unimodale Korngrößenverteilung vorliegt, deren Maximum zwischen 0,05 und 0,2 µm liegt (verschiedene Quellen, zitiert bei Nussbaumer /29/). Beispielsweise resultiert die bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Spanplatten, Altholz und Gras in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung freigesetzte Partikelmasse zu mehr als 80 % aus Partikeln mit einem Durchmesser von unter 1 µm /20/ /21/. Die submikronen Partikelkonzentrationen variieren dabei von 70 mg/Nm^3 bei 11 Vol.-% O_2 (naturbelassenes Holz) bis 580 mg/Nm^3 (Gras). Eine Ausnahme bilden Brennstoffe mit erhöhtem Rindenanteil, bei deren Verbrennung in einer Vorschubrostfeuerungen nur mit rund 50 % bzw. 30 mg/Nm^3 Flugstaubpartikel im Submikronbereich zu rechnen ist und deren Partikel bimodal mit Maxima bei ca. 0,1 und 6 µm verteilt sind /21/ /22/.

Auch bei der Brennstoffnutzung in kleineren häuslichen Zentralheizungskesseln sind erhebliche brennstoffbedingte Unterschiede zu erwarten. Untersuchungen der Landtechnik Weihenstephan an einer automatisch beschicken Biomassefeuerung (50 kW Nennwärmeleistung) zeigen, dass bei sämtlichen Halmgutbrennstoffen und beim Rapspresskuchen ein deutlich höherer Feinstaubanteil festzustellen ist als beim Fichtenhackgut /26/. Beim Halmgut und beim Rapspresskuchen entfallen demnach rund 80 % der gemessenen Flugstaubpartikel auf den aerodynamischen Durchmesserbereich bis 0,45 µm (Weizenstroh) bzw. bis 1,8 µm (Triticale-Ganzpflanze). Damit liegt auch bei Kleinfeuerungen der größte Teil der Gesamtstaubemission bei diesen Brennstoffen im Submikronbereich (d_{ae} < 1 µm) vor.

Allerdings trifft das nicht für Fichtenholz zu, wo der Flugstaubanteil im Submikronbereich mit rund 35 % deutlich geringer war. Diese Brennstoffunterschiede zwischen Halmgut und Holz treten noch deutlicher zu Tage, wenn anstelle der Massenanteile (relative Werte) die Massenkonzentrationen (tatsächlich emittierte Massen) verglichen werden. Beispielsweise für den Brennstoff "Weizenstrohpellets" lag die mittlere Emission der Submikronpartikel mit 119 mg/Nm^3 (bei 13 % O_2)) um rund das 8-fache höher als beim Fichtenholz; dagegen waren die relativen Massenanteile nur um das 2,4-fache höher /26/.

Für die submikronen Partikel, die den Hauptanteil der Feststoffemissionen ausmachen, besitzen konventionelle Zyklone nahezu keine Abscheidewirkung. Eine effiziente Abscheidung ist lediglich durch filternde Abscheider (z. B. Gewebefilter, Elektrofilter) möglich. Derartige Maßnahmen sind aber für die meisten Kleinanlagen wirtschaftlich untragbar. Das gilt insbesondere für die Scheitholzkessel, die in der Regel gegenüber Hackschnitzelfeuerungen meist geringere Nennwärmeleistungen aufweisen, aber auch für Pelletheizkessel, bei denen handelsübliche Anlagen schon im Leistungsbereich ab ca. 8 kW angeboten werden. Insbesondere für die beiden letztgenannten Feuerungsarten liegen bislang kaum belastbare Messungen über die Partikelgrößenverteilung der emittierten Stäube vor.

2 Zielsetzung

Auf Basis der in Kapitel 1 vorgestellten Problematik und aufgrund der teilweise lückenhaften Kenntnisse bei bestimmten Feuerungsarten sollen in der vorliegenden Untersuchungen repräsentative Messungen über die Emissionen unterschiedlicher Staubpartikelgrößen aus häuslichen Holz-Zentralheizungsanlagen (Wärmeleistung < 50 kW) durchgeführt werden. Dadurch sollte der Kenntnisstand über Staubemissionen in diesem Bereich verbessert werden und die Einschätzungen über das Risikopotential der Holzverbrennung auf eine verbreiterte Datenbasis gestellt werden. Neben den Erkenntnissen über den Gesamtstaubausstoß sowie dessen Korngrößenverteilung sollten zusätzliche Messdaten bezüglich der übrigen umweltrelevanten Schadstoffkomponenten (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide) sowie über den Wirkungsgrad gewonnen werden, um so eine Gesamtbeurteilung zu ermöglichen und gegebenenfalls Wechselwirkungen zu erkennen. Um das Ziel einer möglichst umfassenden Darstellung der in der Praxis möglichen Partikelemissionen zu erreichen, mussten verschiedene Aspekte und Einflussgrößen berücksichtigt werden, durch die die Bandbreite der Betriebszustände und Einsatzbedingungen abgedeckt werden konnte. Diese Aspekte werden nachfolgend dargestellt.

- *Unterschiedliche Feuerungsarten*

Um das vorliegende Spektrum von Feuerungsarten ausreichend genau bewerten zu können, waren für die Messungen sowohl automatisch als auch handbeschickte Feuerungen auszuwählen. Bei den automatischen Feuerungen sind sowohl Hackschnitzelfeuerungen als auch Pelletfeuerungen von Bedeutung, so dass beide Prinzipien in der Untersuchung berücksichtigt werden mussten. Gleichzeitig unterschieden sich die darin eingesetzten Brennstoffe (Hackschnitzel, Pellets), wodurch eine weitere Variabilität untersucht wurde.

- *Stand der Technik*

Damit auch der Altbestand von Anlagen aus den Anfängen der technologischen Entwicklung in der Feuerungstechnik zumindest ansatzweise bewertet werden kann, wurden sowohl eine moderne Anlage als auch eine Altanlage (beides Scheitholzkessel) in die Untersuchung mit einbezogen.

- *Laststufe*

Da die momentane Heizlast der Anlage einen Wirkung auf den Schadstoffausstoß haben kann, musste auch dieser Einfluss in zwei bis drei Stufen berücksichtigt werden. Dadurch sollten die wichtigsten Betriebszustände, die in der Praxis der Holzverbrennung auftreten können, erfasst werden.

- *Wassergehalt.*

Auch der Wassergehalt kann sich auf das Niveau des Schadstoffausstoßes auswirken. Bei Pelletfeuerungen ist dieser Parameter jedoch unbedeutend (Maximalwert nach DIN 51 731: 12 % Wassergehalt /8/) und konnte vernachlässigt werden. Bei Scheitholzfeue-

rungen sind zwar Wassergehaltseinflüsse auf das Emissionsverhalten bekannt, jedoch werden aufgrund der leicht zu erreichenden Nachtrocknung im Lagerstapel in der Regel nur trockene Brennstoffe eingesetzt, zumal auch technische Gründe gegen eine Verbrennung von feuchtem Scheitholz sprechen. Auch hier konnte daher auf eine Betrachtung dieses Einflusses verzichtet werden. Größere Variabilität beim Wassergehalt liegt in der Praxis dagegen bei den Hackschnitzelbrennstoffen vor, daher musste dieser Brennstoffparameter in der Untersuchung abgestuft werden.

3 Methodisches Vorgehen

Bei Emissionsmessungen an Holzfeuerungen treten stets eine Vielzahl von Einfluss- und Störgrößen auf, die – anders als bei den homogenen und leicht dosierbaren Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas – die Aussagekraft und die Verallgemeinerungsfähigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Zu diesen Störgrößen zählen die Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften ebenso wie die dynamischen und ständig mehr oder weniger stark wechselnden Betriebszustände in der Feuerung, durch die sich auch die Strömungsverhältnisse in den Mess- und Probenahmestrecken laufend ändern. Messungen an Holzfeuerungen sind daher stets mit einem relativ hohen Maß an Unsicherheit hinsichtlich der Genauigkeit verbunden, mit der die jeweilige Feuerungsart repräsentativ und für das gesamte mögliche Einsatzspektrum abgebildet werden kann. Die versuchstechnischen und methodischen Maßnahmen stellen daher notwendigerweise einen Kompromiss zwischen messtechnisch wünschenswertem und wirtschaftlich vertretbaren Aufwand dar. Das gilt nicht nur für die Auswahl der Praxisfeuerungen, ihre Betriebszustände und die verwendeten Brennstoffe, sondern auch für die Anzahl an Wiederholungen sowie für Fragen der Versuchsdurchführung und der mess- und aufbautechnischen Ausstattung. Nachfolgend werden der Versuchsplan und die messtechnische Vorgehensweise dargestellt, dabei wurde versucht, die o. g. Unsicherheiten so weit wie möglich zu minimieren.

3.1 Versuchsprogramm (Übersicht)

Um die in Kapitel 2 definierten Ziele zu erreichen, wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, welches den Einflussgrößen und der technologischen Vielfalt von Anlagen möglichst umfassend Rechnung trägt. Hierfür wurden zum einen praxistypische Kleinanlagen (Stückholz-, Hackgut-, Pelletkessel) ausgewählt und zum anderen wurde die Wirkung möglicher Einflussgrößen (Anlagenart, Aufbereitungsform des Brennstoffs, Wassergehalt und der Heizlast) berücksichtigt. Der dazu aufgestellte Versuchsplan ist in Tabelle 1 dargestellt. In der Untersuchung wurden gemäß Tabelle 1 für insgesamt 13 verschiedene Varianten jeweils zwei Messungen, d. h. insgesamt 26 Versuche durchgeführt. Bei den ausgewählten Feuerungen handelte es sich um die in Kapitel 3.2 (Tabelle 2) zusammengestellten und beschriebenen Anlagen.

Im Verlauf der Projektdurchführung wurde die angestrebte Anzahl von 26 Versuchen (Tabelle 1) deutlich überschritten, da sich bei den Messungen herausstellte, dass zur Absicherung der Datenbasis weitere Wiederholungen erforderlich waren oder zusätzliche Einstellungen und Teilaspekte betrachtet werden mussten. Beispielsweise wurde ein zusätzlicher Schwachlastversuch mit Buchenholz durchgeführt, weil sich herausstellte, dass das ansonsten verwendete Fichtenscheitholz zu erheblicher Brückenbildung im Glutbereich neigte, wodurch die Messergebnisse kaum für die gesamte Bandbreite der möglichen Holzarten repräsentativ sein konnten. Insgesamt wurden somit 35 Partikelmessungen durchgeführt.

Tabelle 1 Versuchsplan

Feuerungstyp	Brennstoff	Anzahl auswertbarer Partikelmessungen			
		NWL[1)]	MWL[1)]	KWL[1)]	Summe Versuche
Stückholzkessel, "modern"	Scheite	2	--	2	4
Stückholzkessel[l)], "alte Technik"	Scheite	2	--	2	4
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w= 15 %	2	2	2	6
	Hackgut w = 35 %	2	2	2	6
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	2	2	2	6
Summe:		10	6	10	26

[1)] NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinste Wärmeleistung

Versuchsvarianten. Für jeden Kessel wurden Verbrennungsversuche mit trockenem Brennstoff bei Nennwärmeleistung und einer für die Versuche festgelegten kleinsten Wärmeleistung durchgeführt. Letztere lag bei den automatisch beschickten Feuerungen bei ca. 30 % und bei der "modernen" und "alten" Scheitholzkesseltechnik bei ca. 50 bzw. 70 % der Nennwärmeleistung (vgl. Tabelle 9, S. 228). Die Hackgut- und die Pelletfeuerung wurden außerdem bei einer mittleren Wärmeleistung (ca. 60 bis 65 % der Nennwärmeleistung) eingesetzt (vgl. Tabelle 9, S. 228). Bei der Hackgutfeuerung wurden neben dem lufttrockenem Holz auch mittelfeuchter Brennstoff mit einem angestrebten Wassergehalt von ca. 35 % eingesetzt. Dieser Feuchtebereich entspricht der praxisüblichen Variabilität bei kleineren Hackschnitzelfeuerungen. Zum Einsatz kamen Fichtenholz (durchgehend) und in einem zusätzliche Fall auch Buchenholz, das je nach Bedarf auf eine Scheitlänge von 50 cm gesägt und gespalten bzw. zu Hackschnitzeln gehackt wurde. Die Holzpellets wurden von einem Großhändler bezogen und entsprachen laut Hersteller den Anforderungen der DIN 51 731 /8/.

Mess- und Analyseprogramm. Zu jeder Versuchseinstellung wurden je zwei Impaktorprobenahmen über eine Dauer von 1 bis 4 Stunden durchgeführt. Über die jeweilige Probenahmedauer wurden zeitgleich die Emissionen an CO, Gesamtstaub, VOC und NO_x ermittelt, sowie auch die Betriebsparameter der Feuerungsanlage und der Wirkungsgrad (feuerungstechnisch und Kesselwirkungsgrad) registriert. Aufgrund von Störungen während des Versuchsablaufs war bei einzelnen Varianten nur eine Einzelmessung am jeweiligen Versuchstag durchführbar, wodurch eine weitere Messung auf einen neuen Versuchstag verlegt werden musste.

3.2 Beschreibung der Feuerungsanlagen

Bei den ausgewählten Feuerungen handelte es sich um die in Tabelle 2 dargestellten Anlagen. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Anlagen geben die nachfolgenden Kapitel 3.2.1 bis 3.2.4.

Tabelle 2 Für die Messungen ausgewählte Feuerungsanlagen

Bezeichnung	Hersteller, Typ	Nennwärmeleistung, NWL[1)] (kW)
Stückholzkessel "modern"	Fröling, FHG Turbo 3000	30
Stückholzkessel "alte Technik"	HDG Bavaria, Typ SL 33 (heute nur noch als Wärmetauscher verwendet)	33
Hackgutkessel	Heizomat, HSK-RA-50	50
Pelletkessel	Fischer Guntamatic, BIOSTAR 15	15

[1)] Laut Herstellerangabe

3.2.1 Stückholzkessel "modern"

Als Stückholzkessel wurde eine Feuerung vom Typ FHG Turbo 3000 von der Firma Fröling zur Verfügung gestellt (Abb. 1). Sie wurde fabrikneu angeliefert. Um einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem einwöchigen Betrieb "eingefahren".

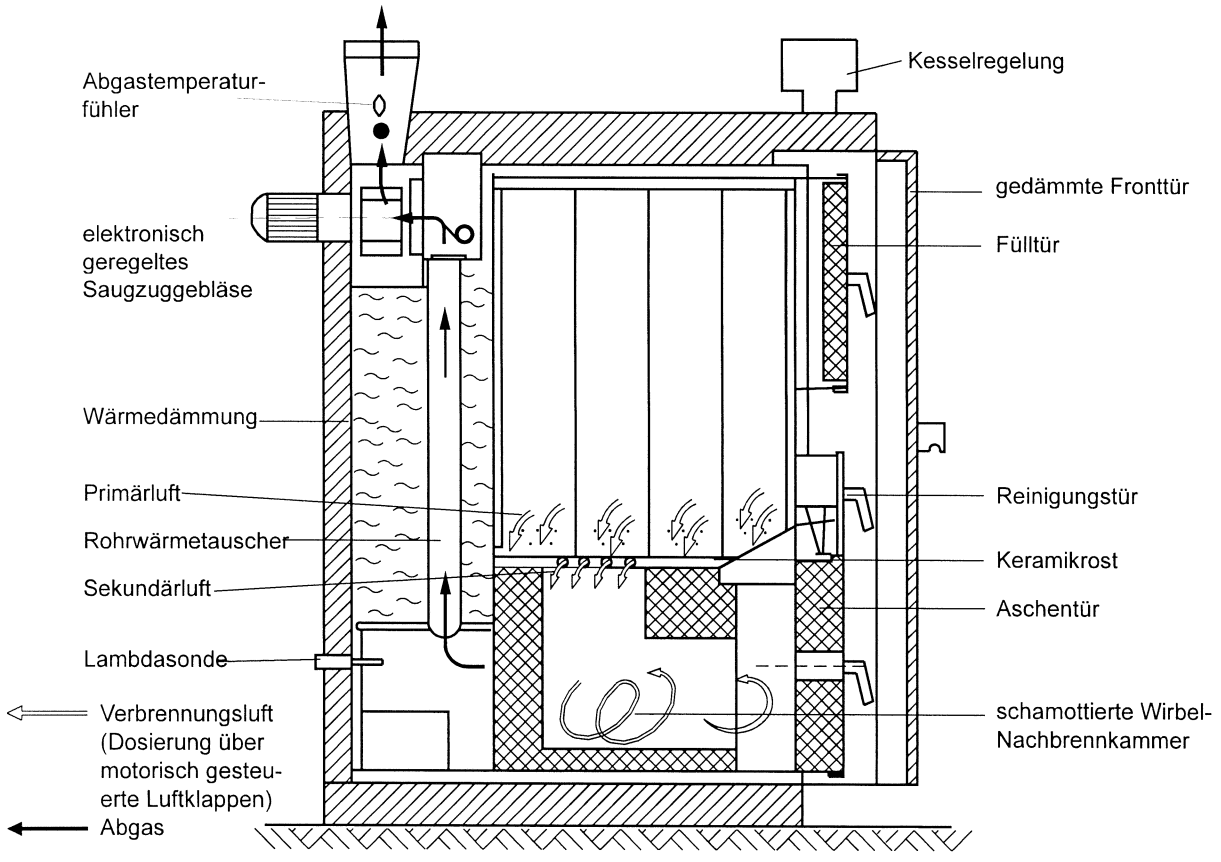


Abb. 1 Schematische Darstellung des Stückholzkessels FHG Turbo 3000 (Fröling)

Die Anlage weist ein Wärmeleistungsspektrum von 9 bis 30 kW auf und ist für den Einsatz von Grobhackgut und Stückholz mit einer Länge bis 50 cm zugelassen.

Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr wird in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3 Anlagentechnische Merkmale des Stückholzkessels FHG Turbo 3000

Anlagenkomponente	Ausführung
Feuerung	
Anlagenart	Stückholzfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	unterer Abbrand (Sturzbrand)
Brennstoffzufuhr	manuell
Entaschung	von Hand
Zündung	von Hand
Wärmetauscher	
Form	Wärmetauscher, stehend, mit Schikanen
Reinigung	manuell
Verbrennungsluft	
Primärluftzufuhr	Beidseitig über den Feuerraumboden
Sekundärluftzufuhr	beidseitig in die Brennkammerdüse
Gebläse	Saugzuggebläse
Luftmengenanpassung	Gebläsedrehzahl, Luftklappen
Leistungsregelung	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur, Abgastemperatur
Stellgrößen	Gebläsedrehzahl, Primärluftmenge
Verbrennungsregelung	
Regelgrößen	Abgastemperatur, Lambda
Stellgrößen	Gebläsedrehzahl, Sekundärluftmenge

3.2.2 Stückholzkessel "alte Technik"

Der Stückholzkessel mit "alter Verbrennungstechnik" wurde als Wärmetauscherkessel von der Firma HDG Bavaria zur Verfügung gestellt. Er wurde fabrikneu angeliefert. Um einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem ca. einwöchigen Betrieb "eingefahren".

Bei dieser Anlage (Abb. 2) handelt es sich um eine Bauform, die ursprünglich als Scheitholzkessel verwendet wurde; heute jedoch lediglich als Wärmetauscherkessel z. B. in Verbindung mit einem Hackschnitzel-Vorofen eingesetzt wird. Aus heutiger Sicht stellt die Anlage daher keine eigene Feuerung sondern vielmehr eine Systemkomponente einer automatisch beschicken Hackgutfeuerungsanlage dar. Folgerichtig ist die Verbrennung von Scheitholz als eine Not-Betriebsart anzusehen. Da derartige Kessel aber in der Vergangenheit auch als eigenständige Feuerungen konzipiert und eingesetzt worden waren, konnte durch eine entsprechende Verwendung als Scheitholzkessel im vorliegenden Messprogramm auf die Betriebs- und Emissionsbedingungen "älterer Techniken" und somit auf den Altanlagenbestand mit niedriger technologischer Reife geschlossen werden.

Als Festbrennstoffkessel hat die Feuerung vom Typ SL 33 eine Nennwärmeleistung von 33 kW. Die Verbrennungsluftzufuhr erfolgt durch den natürlichen Kaminzug (Naturzug) über eine frontseitige Luftklappe, dabei ist keine Aufteilung in Sekundär- oder Primärluft möglich. Über eine thermostatisch betätigte Luftklappe wird – in Abhängigkeit von der Kesselwassertemperatur – lediglich die zugeführte Gesamtluftmenge eingestellt bzw. ge-

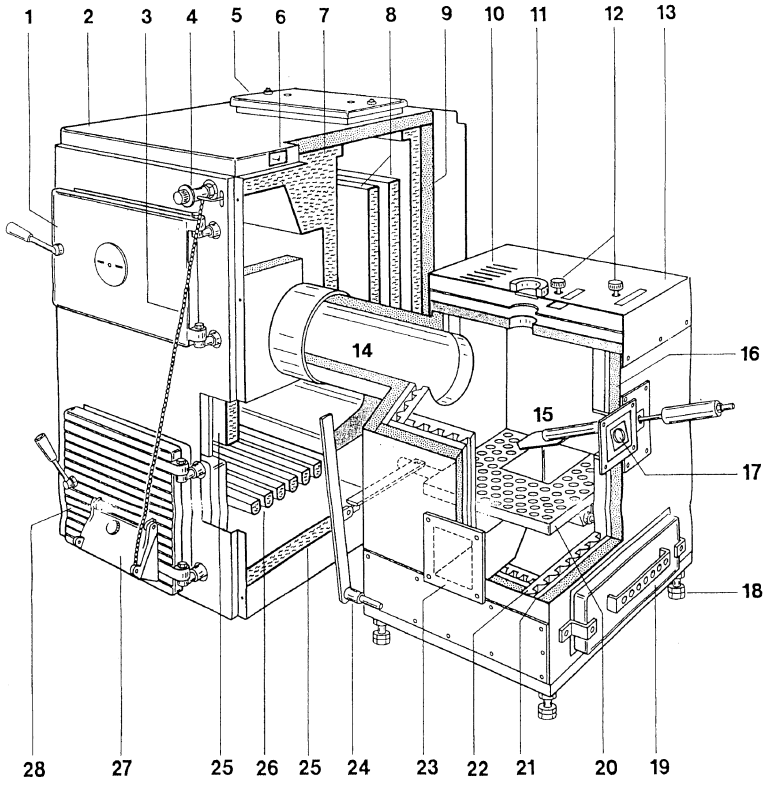


Abb. 2 Schematische Darstellung des Wärmetauscherkessels SL 33; hier mit Vorofen

drosselt. Im Unterschied zu modernen Scheitholzkesseln verfügt diese Feuerung auch nicht über eine räumliche Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung. Da die Wärmetauscherflächen somit teilweise auch die unmittelbare Abgrenzung des Feuerraums bilden, werden die Flammen und Brenngase bereits während der Verbrennung abgekühlt, wodurch sich die Emission unverbrannter Abgasbestandteile erhöht.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4 Anlagentechnische Merkmale des Wärmetauscherkessels SL 33 (HDG)

Anlagenkomponente	Ausführung
Feuerung	
Anlagenart	Stückholzfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	unterer seitlicher Abbrand (wassergekühlter Rost)
Brennstoffzufuhr	manuell
Entaschung	von Hand
Zündung	von Hand
Wärmetauscher	
Form	Plattenwärmetauscher, stehend
Reinigung	manuell
Verbrennungsluft	
Primärluftzufuhr	von vorne durch den Rost
Sekundärluftzufuhr	keine
Gebläse	Naturzug
Luftmengenanpassung	thermostatischer Feuerungsregler (Luftklappe)
Leistungsregelung	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
Verbrennungsregelung	
Regelgrößen	Keine
Stellgrößen	keine

3.2.3 Hackgutkessel

Als Hackgutkessel wurde eine Feuerung vom Typ HSK-RA 50 (Abb. 3) von der Firma Heizomat zur Verfügung gestellt. Sie wurde zusammen mit einer Brennstoffzuführung fabrikneu angeliefert. Um ihr Betriebsverhalten kennen zu lernen und um eine optimale Anlageneinstellung zu erreichen sowie einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem einwöchigen Betrieb "eingefahren".

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 eine 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 umschaltet.

Brennstoffzuführung. Zur Brennstoffbevorratung und zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs wurde eine separate Austrageinrichtung verwendet (Eigenbau Landtechnik Weihenstephan). Diese Vorrichtung besteht aus einem Tagesvorratsbehälter und einer

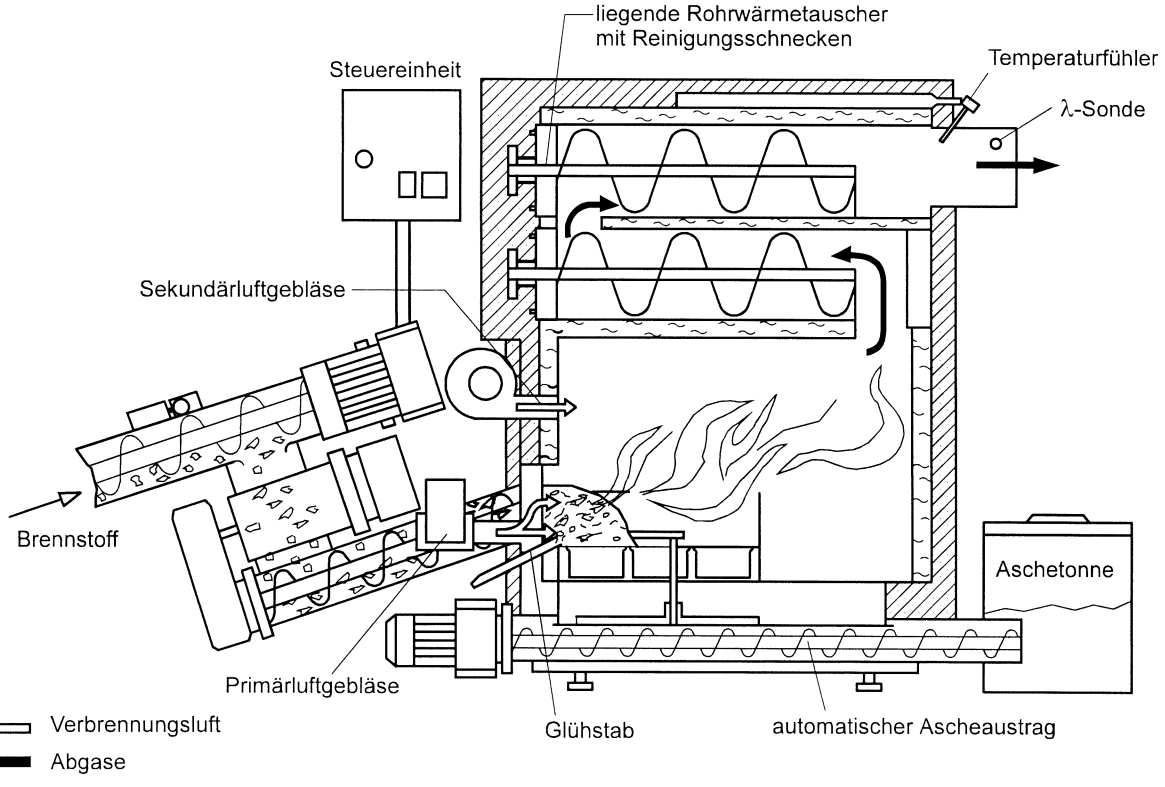


Abb. 3 Schematische Darstellung des Hackgutkessels HSK-RA-50 (Heizomat)

stufenlos einstellbaren Austragsschnecke, die von der Regelung der Feuerungsanlage angesteuert wurde. Zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs über den jeweiligen Auswertezeitraum war die Zuführungseinrichtung an einer Wägezelle aufgehängt.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5 Anlagentechnische Merkmale der Hackgutfeuerung HSK-RA 50 (Heizomat)

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

[1)] wurde während des Probenahmezeitraumes deaktiviert

3.2.4 Pelletkessel

Der Pelletkessel BIOSTAR 15 (Abb. 4) wurde von der Firma Fischer Guntamatic zur Verfügung gestellt. Die Feuerungsanlage (Kessel und Brennstoffzuführung) war vor dem Anlieferungszeitpunkt bereits vom Hersteller in Betrieb genommen und getestet worden, so dass für die Messungen eine bereits "eingefahrene" Feuerung in praxisnahem Anlagenzustand verwendet werden konnte.

Die Feuerungsanlage vom Typ Biostar 15 hat einen Wärmeleistungsbereich von 3,5 bis 15 kW und ist für den Einsatz von Holzpellets nach ÖNORM M 7135 geeignet. Um sicherzustellen, dass größere Ascheablagerungen vom Rost vollständig entfernt werden, ist die Anlage mit einem automatischen Kipprost ausgestattet. Von Zeit zu Zeit wird der Kipp-Mechanismus selbsttätig ausgelöst, wodurch der als Lochplatte ausgeführte Rost herunterklappt und gegen eine vertikale Reinigungsplatte im Bereich des Rostaschesammlers prallt (Abb. 4). Dadurch lassen sich auch eventuell anhaftende Ablagerungen, die zu Lochquerschnittsverengungen führen können, beseitigen. Die zusammen mit der Asche abgekippten noch brennbaren Bestandteile glühen im Aschebett aus während neu zugeführte Pellets auf dem gereinigten Rost gezündet werden.

Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr und die Brennstoffmenge wird in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt. Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

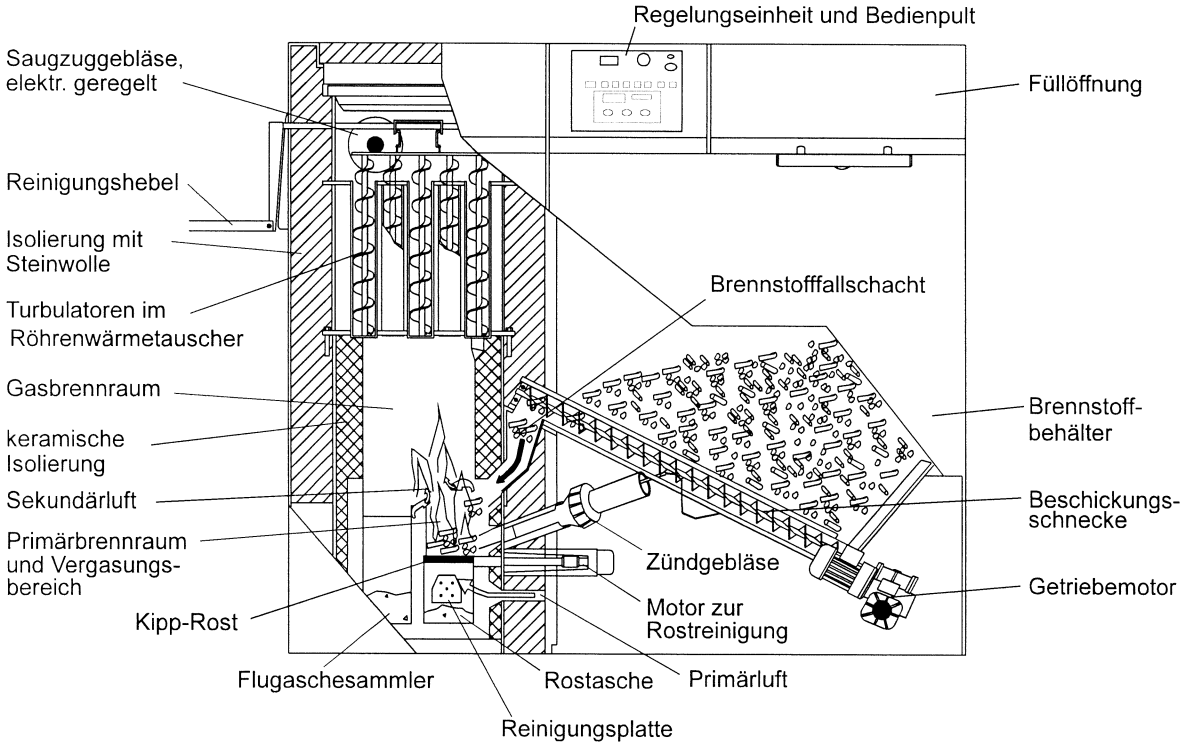


Abb. 4 Schematische Darstellung des Pelletkessels BIOSTAR 15 (Fischer Guntamatic)

Tabelle 6 Anlagentechnische Merkmale des Pelletkessels BIOSTAR 15

Anlagenkomponente	Ausführung
Feuerung	
Anlagenart	Pelletfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	Fallschacht mit automatischem Kipprost (Flachrost)
Brennstoffzufuhr	automatisch mit Förderschnecke
Entaschung	automatisch durch Kipprost[1)]
Zündung	automatisch mit Heißluftgebläse
Wärmetauscher	
Form	stehender Rohrwärmetauscher
Reinigung	von Hand mit Turbulatoren
Verbrennungsluft	
Primärluftzufuhr	durch Kipprost
Sekundärluftzufuhr	an Düse zwischen Primär- und Sekundärbrennraum
Gebläse	ein Saugzuggebläse
Luftmengenanpassung	Gebläsedrehzahl
Leistungsregelung	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur
Stellgrößen	Brennstoffmenge, Verbrennungsluftmenge
Verbrennungsregelung	
Regelgrößen	Lambda und Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoffmenge, Verbrennungsluftmenge

[1)] Die automatische Entaschung wurde während des Messzeitraumes deaktiviert

3.3 Versuchsbrennstoffe

Um den Einfluss unterschiedlicher Brennstoffeigenschaften bei den Verbrennungsversuchen so gering wie möglich zu halten, wurde für die Versuche mit Scheitholz und Hackschnitzeln ein einheitliches Ausgangsmaterial verwendet. Das Hackgut wurde daher aus dem gleichen Scheitholzbestand unmittelbar vor Versuchsbeginn mit einem mobilen Hacker hergestellt. Lediglich bei den Pellets konnte kein Einfluss auf die Rohstoffbasis genommen werden; sie wurden von der Firma Umdasch (Österreich) zur Verfügung gestellt und erfüllten die Anforderungen der DIN 51 731, Größenklasse HP 5 /8/. Einen Überblick über die verwendeten Brennstoffe gibt die Tabelle 7. Die verwendeten Prüfmethoden sind in Kapitel 3.5.2 dargestellt.

Tabelle 7 Brennstoffparameter zum Zeitpunkt der Feuerungsversuche

Brennstoff	Aufbereitung	Wassergehalt %
Fichte	Scheitholz[1)]	15
Buche	Scheitholz[1)]	15
Fichte 1	gehackt	14
Fichte 2	gehackt	36
Holz	pelletiert	8

[1)] *Länge 50 cm, Umfang 25-30 cm*

3.4 Versuchsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden überwiegend auf dem Feuerungsprüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik durchgeführt. Eine Ausnahme bilden die Versuche mit dem Scheitholzkessel "alte Technik", die auf dem Feuerungsprüfstand des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart durchgeführt wurden. Die messtechnische Ausstattung und die Versuchsbedingungen waren an beiden Standorten mit Ausnahme des Verdünnungstunnels (siehe unten) vergleichbar und wurden für diesen Messfall durch gemeinsame Planung und Abstimmung sowie durch gemeinsame Versuchsdurchführung am Standort Stuttgart sichergestellt. Den Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung (am Standort in Weihenstephan) zeigt Abb. 5.

Abgasmessstrecke. Die Staubpartikelverteilung und der Gesamtstaubgehalt mussten zeitgleich erfasst werden; hierzu bestand der Versuchsaufbau abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit einem Übergangsstück zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage. Die Messstellen für den Impaktor und das Filterkopfgerät wurden übereinander in ausreichendem Abstand von ca. 4xD angeordnet (in Anlehnung an VDI 2066 Blatt 1 /38/). Um zusätzliche Störeinflüsse zu vermeiden, wurde die Geschwindigkeitsmessstelle und die Gasprobenahmesonde am Ende der Messstrecke platziert. Im vertikalen Rohr waren die "DIN-Messstellen" für Abgastemperatur und Kaminzug untergebracht. Sie sind in ihrer Lage und Position nach DIN 4702 Teil 2 /7/ (Regeln für die heiztechnische Prüfung) angeordnet. Aufgrund der geringen Deckenhöhe des Prüfraumes und zur Anhebung der Gasgeschwindigkeit wurde die vertikale Messstrecke im Rohrquerschnitt auf einen Rohrinnendurchmesser von 100 mm reduziert. Dadurch konnte auch bei geringen Abgasmassenströmen die Ermittlung der Gasgeschwindigkeit mit einfacher Differenzdruckmessung erfolgen. Außerdem ermöglichte diese Maßnahme die isokinetische Probenahme, da die vorhandenen Düsensätze erst für höhere Abgasgeschwindigkeiten geeignet waren. Nach Durchtritt durch die Messstrecke wurde das Abgas über eine flexible Verbindungsleitung in einen Edelstahlkamin geleitet und über diesen an die Umgebung abgeführt.

Verdünnungstunnel. Die Probenahmen am Scheitholzkessel "alte Technik" mussten auf dem Prüfstand des Instituts für Verfahrenstechnik (IVD) mit Hilfe eines Verdünnungs-

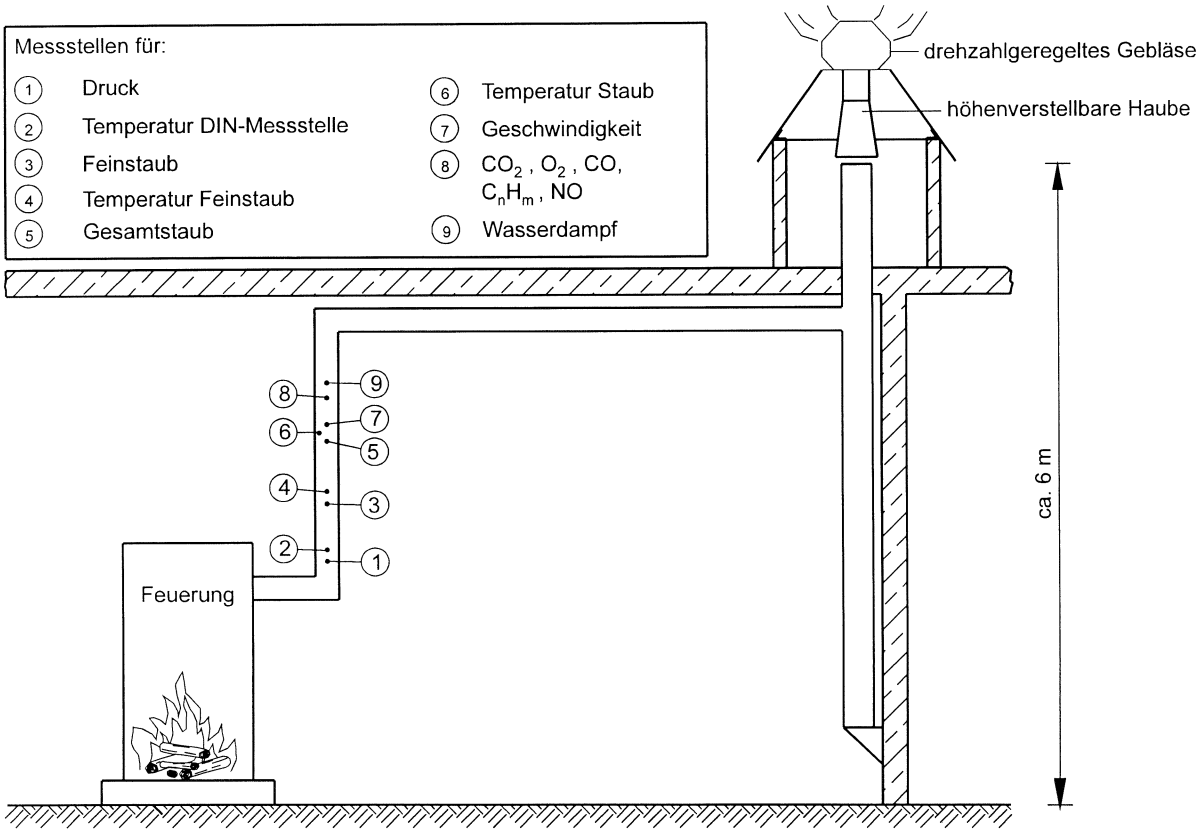


Abb. 5 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung

tunnels durchgeführt werden, da derartige Altkessel erfahrungsgemäß einen überdurchschnittlich hohen Anteil an kondensierbaren Anteilen im Abgas aufweisen. Der genaue Aufbau dieser Versuchsanlage ist im Teilbericht des IVD zu diesem Projekt beschrieben.

Wärmeleistungsmessstrecke. Die Feuerungsanlagen wurden 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 /7/ (vgl. „Kreislauf mit Kurzschlussstrecke“). Sie wird ebenso wie der gesamte Kühlkreislauf bei LAUNHARDT et al. /27/ ausführlich beschrieben.

3.5 Mess- und Analyseverfahren

3.5.1 Feuerungs- und Emissionsmessgrößen

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

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Organische Stoffe (Volatile Organic Carbon, VOC)
- Stickstoffoxide (NO_x)

- Gesamtstaub
- Feinstaub (Partikelgröße und -verteilung des Staubes)

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Kohlenstoffdioxidgehalt im Abgas (CO_2)
- Wärmeleistung und Kesselwirkungsgrad und feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Abgastemperaturen

Zusätzlich wurden weitere Messgrößen wie Wasserdampfgehalt und Sauerstoffgehalt zur Umrechnung von Messgrößen erfasst. Die Anordnung der jeweiligen Messgeräte im Abgasstrom zeigt Abb. 6. Einige Messgrößen wurden kontinuierlich erfasst, andere nur diskontinuierlich.

Kontinuierlich erfasste Messgrößen. Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzte Messgerätetechnik werden in Tabelle 8 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind in den zugehörenden DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert.

Alle Messdaten wurden als Analogsignale von zwei Dataloggern (FLUKE HYDRA 2620A) erfasst und von einem Personal Computer zur weiteren Verrechnung und Daten-

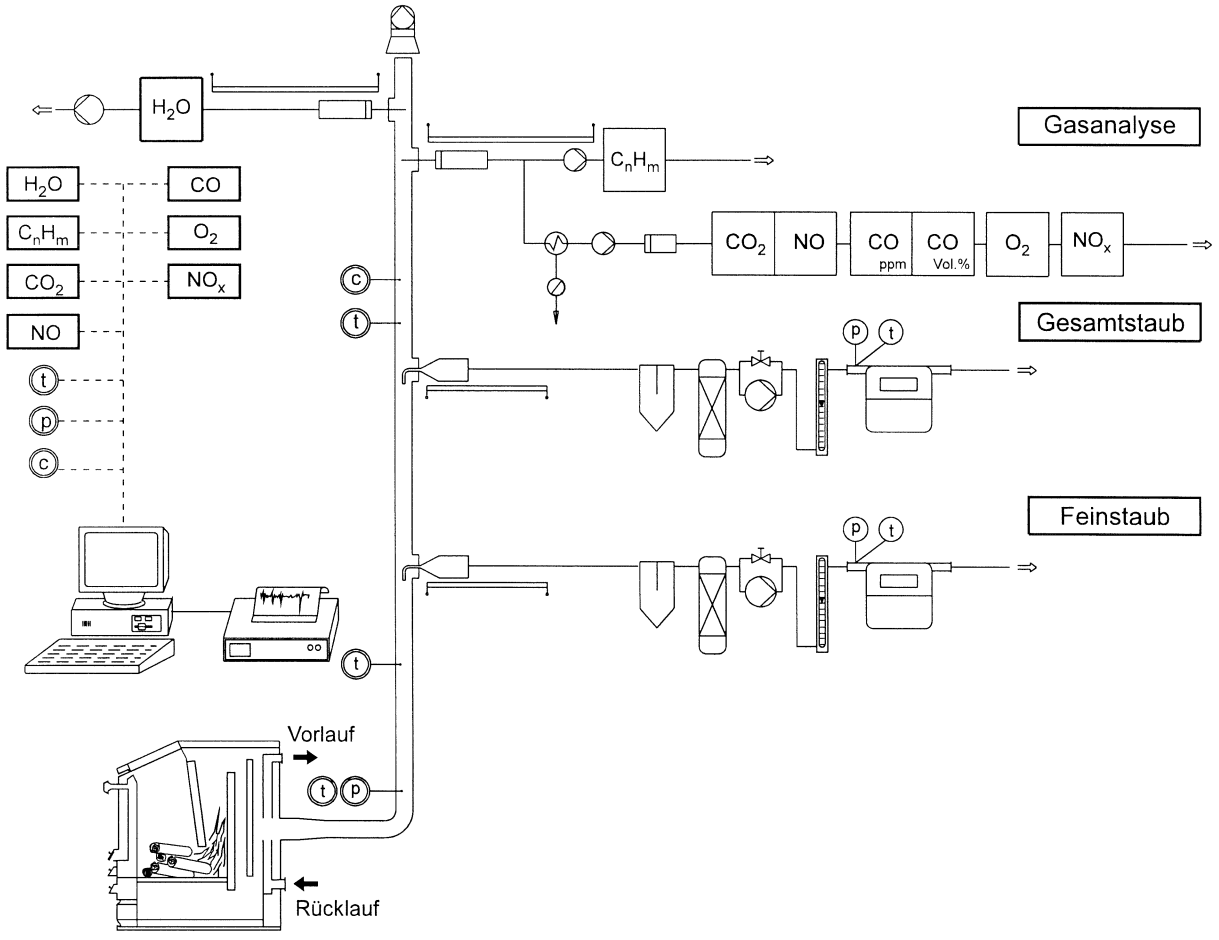


Abb. 6 Schematische Darstellung des Messgeräteaufbaus auf dem Prüfstand der Landtechnik Weihenstephan

speicherung 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.

Diskontinuierlich erfasste Messgrößen. Die Bestimmung der Staubemissionen als Gesamtstaub und Feinstaub (Partikelmasse, Partikelverteilung und -größe) 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, dem Institut für Verfahrentechnik der Universität Stuttgart, wurde für die Dauer der Versuchsreihen ein Kaskadenimpaktor Typ MARK 3 zur Verfügung gestellt.

Tabelle 8 Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskonzentration[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	---
Abgasbestandteile				
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_2O	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_3H_8 in N_2
NO	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-300 ppm	240 ppm NO in N_2
NO_x[7)]	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0-250 ppm	240 ppm NO in N_2
Wärmeleistung und Wirkungsgrad				
Temperatur[8)]	Widerstandsthermometer (PT100), Fa. Heraeus	temperaturabhängige Widerstandsänderung	(-)50-150 °C	---
Kühlwasserstrom	Flügelradzähler mit Kontaktgeber, Fa. Spanner-Pollux	Flügelradrotation	0,12-2,5 m^3/h	---
Brennstoffmenge	Brennstoffwaage, Fa. PESA	digitaler Zwei-Saiten-Massen-Maßgeber	0 - 60 kg	---
Brennstoffmassenstrom	Wägezelle mit Messverstärker, Fa. Hottinger Baldwin	Wägung	0-500 kg	---

Hinweise: Bestimmung von VOC und H_2O im feuchten Abgas bei vorgeschaltetem beheiztem Keramikfilter (Betriebstemperatur: 180 °C, Porengröße: ca. 0,9 µm) und beheizter Messgasleitung (Betriebstemperatur: 180 °C, Länge 5 m) Bestimmung von O_2, CO_2, CO, NO, NO_x im trockenen Abgas nach Messgaskühler (Gasausgangstaupunkt: 5 °C) un Partikelfeinfilter (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 (ϑ = 180 °C) gemäß VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1 /43/, Ergebnisse bezogen auf trockenes Abgas
7) $NO_x = NO + NO_2$
8) Vor- und Rücklaufwassertemperatur, Kühlwassertemperatur, Raum- und Außentemperatur (je eine Messstelle)

Staub (Partikelmasse). Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte nach dem in den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 /40/ und Blatt 3 /41/ beschriebenen Messverfahren (Methode mit "Filterkopfgerät"). 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 = 100 mm) außerhalb des Abgaskanales angeordnet war. Je nach Erfordernis wurde das Absaugrohr und das Rückhaltesystem beheizt um eine Unterschreitung des Abgastaupunktes zu vermeiden. Nach der Quarzfaserhülse 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 einer Gesamtstaubprobenahme richtete sich nach der Dauer der Impaktorprobenahme und erfolgte über einen Zeitraum von 30 bis 120 Minuten. Parallel zu jeder Impaktorprobenahme wurden zwei Staubfilterhülsen beprobt. Die Beladung der Hülsen lag dabei zwischen 15 und 100 mg. Der Probengasdurchsatz lag in einem Bereich von 1 bis 2 Nm³/h. Die Bestimmung der Staubmasse erfolgte gravimetrisch mit einer elektronischer Präzisionswaage (Fa. Mettler, Auflösung: 0,1 mg) durch Einwiegen der unbeladenen und Rückwiegen der beladenen Messfilter gemäß VDI-Richtlinie 2066 Teil 1 /40/. Die Wägung sowie die Konditionierung der Filter wurde im Labor der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt.

Partikelgröße und -verteilung. Die Analyse der Partikelgrößen und deren Verteilung erfolgte nach dem in der VDI-Richtline 2066 (Blatt 5) /39/ beschriebenen Impaktor-Messverfahren (Impaktionsverfahren). Zur partikelgrößenabhängigen Auftrennung der Staubemission wird bei diesem Verfahren die unterschiedliche Trägheit von Partikeln ausgenutzt. Dazu wird ein repräsentativer Teilgasvolumenstrom durch eine Kaskade von Düsen- und Impaktionsplatten (Prallplatten) eines Impaktors geleitet. In den Bohrungen der Düsenplatte wird der partikelbeladene Abgasteilstrom jeweils beschleunigt und strömt in Richtung der Prallplatte (Abb. 7). Partikel, die auf Grund ihrer Trägheit dem Gasstrom nicht folgen können, werden auf die Prallplatte geschleudert und bleiben haften. In den von Stufe zu Stufe kleiner werdenden Düsenbohrungen erhöht sich die Gasgeschwindigkeit wodurch der beprobte Staub in mehrere Fraktionen aufgeteilt wird. Als unmittelbares Ergebnis einer Impaktormessung erhält man durch Wägung die auf den einzelnen Sammelplatten impaktierten Partikelmassen.

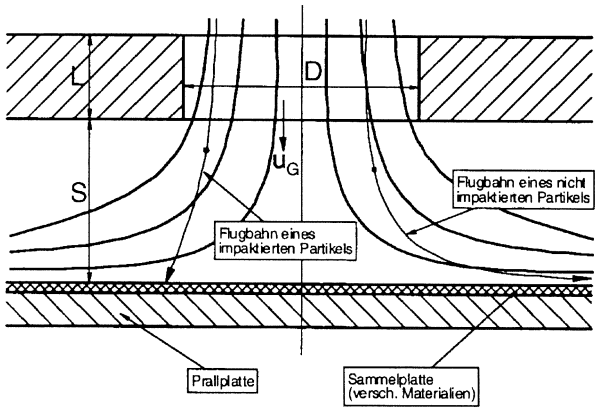


Abb. 7 Partikelflugbahn

Um die impaktierten Partikelmassen einer Partikelgrößenklasse zuordnen zu können, ist der Abscheidegrad der einzelnen Impaktorstufen (= Wahrscheinlichkeit, mit der Partikel bestimmter Größe auf der Prallplatte impaktieren und dort haften bleiben) in Abhängigkeit von der Partikel-

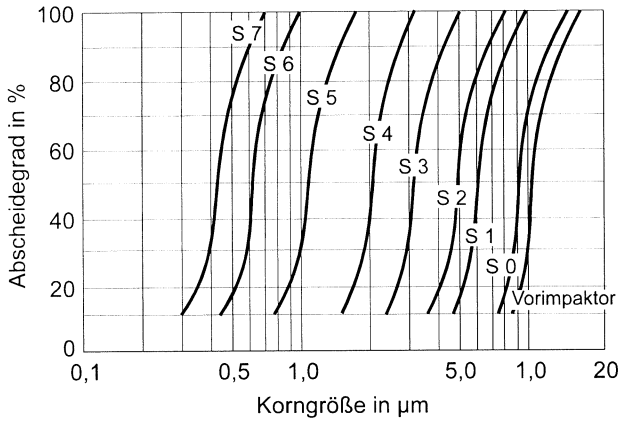


Abb. 8 Trennlinien der Impaktorstufen (S) /1/

größe zu beschreiben. Unter der Annahme eines bestimmten Abscheidegrades ist damit jeder Impaktorstufe eine charakteristische Partikelgröße zuzuordnen. Als Maß für die Partikelgröße wird der aerodynamische Durchmesser (d_{ae}) herangezogen. Dieser ist für Partikel beliebiger Form und Dichte definiert als der Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 (1 g/cm^3), die die gleiche Sinkgeschwindigkeit in ruhender oder laminar strömender Luft besitzt /4/. Der aerodynamische Durchmesser, bei dem eine Abscheidewahrscheinlichkeit von 50 % (Mediane der Partikelgrößenverteilung auf der Prallplatte) besteht, ist als der Grenzpartikeldurchmesser (d_{ae} 50) definiert. Er stellt die Trenngrenze zwischen zwei impaktierten Fraktionen dar. Bei relativ steiler Trennkurve der einzelnen Impaktorstufen (Abb. 8) wird dabei vereinfachend angenommen, dass alle Partikel mit einem Durchmesser größer bzw. gleich dem Grenzpartikeldurchmesser der betreffenden Impaktorstufe und kleiner als dem Grenzpartikeldurchmesser der vorausgegangenen Stufe abgeschieden werden. Eine detaillierte Beschreibung der hier dargestellten Zusammenhänge findet sich in VDI-Richtlinie 2066 (Teil 5) /39/.

Bei den durchgeführten Messungen wurde ein 9-stufiger Präzisions-Kaskadenimpaktor der Fa. Andersen (Typ Mark III, Abb. 9) eingesetzt. Bei diesem Gerät sind die Prallplatten mit geeigneten Materialien (Sammelplatten) belegt und enthalten jeweils die Düsen der nachfolgenden Trennstufe. Die einzelnen Trennstufen sind in der Weise angeordnet, dass das staubbeladene Abgas von oben in den Impaktor eintritt, auf die erste Prallplatte trifft und von dieser unter Abscheidung der Grobpartikel (d_{ae} > 13 µm) durch deren Düsen in Richtung der zweiten Prallplatte abgelenkt wird. Von dort wird das Abgas unter Abscheidung der nächstkleineren Partikelgrößenklasse umgelenkt und strömt in einer dritten Ebene von oben mäanderförmig durch ver-

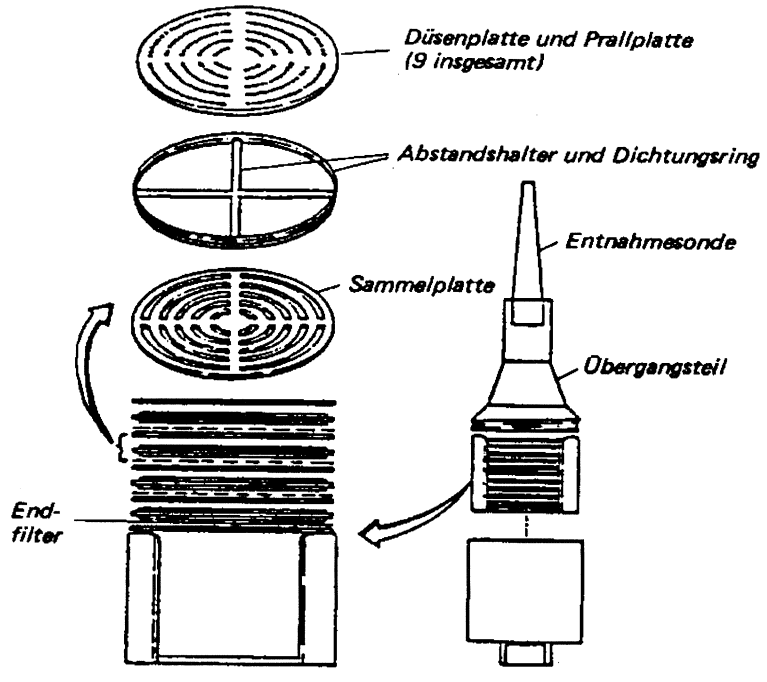


Abb. 9: Schematische Darstellung des Kaskadenimpaktors (Fa. Andersen, Typ Mark III) /1/

schiedene Systemringe nach unten. Dabei erfolgt bei jedem Durchgang eine Abscheidung der für die jeweilige Trennstufe charakteristischen Partikelgrößenklasse. Partikel, die die letzte Trennstufe passieren, werden in einem dem Impaktor nachgeschalteten Endfilter zurückgehalten.

Um eine fehlerfreie Impaktion der Partikel zu erzielen, ist der Kaskadenimpaktor mit einem konstanten Gasvolumenstrom zu beaufschlagen. Zur Auftrennung möglichst kleiner Partikelgrößen ist zudem ein möglichst hoher konstanter Absaugvolumenstrom anzustreben. Bauartbedingt liegt der maximal absaugbare Gasvolumenstrom bei ca. 1,5 m^3/h. Bei den vorgenommenen Messungen wurde mit einem Gasvolumenstrom von ca. 1,0 m^3/h im Betriebszustand abgesaugt, wodurch eine Fraktionierung im Partikelgrößenbereich von ca. 0,5 bis 13 µm (bezogen auf d_{ae}) erfolgte, bei der drei Impaktorstufen die Partikel im Submikronbereich (< 1 µm) und fünf Stufen die Partikel im Größenbereich von 1 bis 10 µm trennen. Geringere Absaugvolumenströme bewirken dagegen eine Verschiebung der Partikelgrößenbereiche hin zu größeren Durchmessern

Der Kaskadenimpaktor wurde aus Platzgründen außerhalb des Abgaskanals angeordnet und die Düse mittels einer Schwanenhalssonde in die Messstrecke geführt. Um eine Kondensation des Probegases zu vermeiden, wurde das Impaktorgehäuse vor Beginn und während der Absaugung mit Hilfe einer Heizvorrichtung temperiert. Die nachgeschaltete Absaugapparatur entsprach der Apparatur, die bereits bei der Partikelmassenbestimmung verwendet wurde (siehe oben). Die Teilvolumenstromentnahme aus dem Hauptgasstrom erfolgte annähernd isokinetisch.

Die Dauer einer Impaktormessungen lag zwischen 60 bis 240 min, in denen Gesamtbeladungen von 10 bis 50 mg erzielt wurden. Die Wägung der Sammelplatten sowie deren Konditionierung wurde im Labor der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt (vgl. Staubgehaltsmessung, S. 222) und erfolgte nach VDI 2066, Blatt 5 /39/.

Abweichend davon wurde jedoch auf eine Behandlung im Trockenschrank nach der Beladung der Sammelplatten verzichtet, um Masseverluste durch zu häufiges Handhaben der empfindlichen Filtermedien zu vermeiden. Die beladenen Sammelplatten wurden stattdessen mehrere Stunden im Exsikkator gelagert. Diese Methode wurde angewendet, da zahlreiche Sammelplatten oft nur unter einem Milligramm beladen waren. In Vorversuchen waren hierbei vernachlässigbar geringe Abweichungen der Methoden festgestellt worden, so dass die gewählte Vorgehensweise zulässig war. Zur Bewertung der Minderbefunde im Impaktor wurden die Konzentrationen aus den Messungen mit dem Filterkopfgerät herangezogen.

Die Auswertung der Impaktorprobenahme erfolgte mit Hilfe einer Auswertungsvorlage gemäß VDI 2066 Blatt 5, die vom IVD zur Verfügung gestellt wurde.

3.5.2 Brennstoffparameter

Als Brennstoffparameter wurde der Wassergehalt bestimmt. Ergebnisse hierzu sind im Kapitel 3.3 (Tabelle 7) aufgeführt.

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte im Trockenschrank bei 105 °C nach DIN 51718 /11/. Je Probe wurde eine Zweifachbestimmung mit jeweils 200-800 g Einwaage (frisch) durchgeführt.

Analysen zur Bestimmung des Heizwertes und der Elementgehalte C, O, H, N, S, die für die Auswertungen und Emissionsberechnungen erforderlich sind, wurden hier nicht durchgeführt. Statt dessen konnte hierfür auf Werte aus der NAWARO-Datenbank der Landtechnik Weihenstephan zurückgegriffen werden /18/, da diese Daten mit einer für die vorliegenden Messungen hinreichenden Genauigkeit verwendbar waren (vgl. Tabelle 10, S. 230).

3.6 Versuchsdurchführung

3.6.1 Inbetriebnahme und Vorversuche

Die Feuerungsanlagen wurde auf dem Prüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik aufgebaut und im Beisein von Vertretern des Herstellers in Betrieb genommen. Anschließend wurden Vorversuche mit den Prüfbrennstoffen durchgeführt, um mit der Bedienung der Anlage vertraut zu werden. Während der Vorversuche wurde außerdem der zu erwartende Gesamtstaubgehalt bestimmt, um so die günstigste Absaugdauer für die spätere Feinstaubprobenahme finden zu können. Die Feuerungsanlagen wurden gemäß den beiliegenden Bedienungsanleitungen betrieben. Die Regelungsparameter der Feuerungen entsprachen den vorgegebenen Werkseinstellungen.

Bei der Hackgutfeuerung wurde die Anlage mit dem Versuchsbrennstoff für die beiden gewählten Laststufen fest voreingestellt. Dabei wurde als Optimierungsgröße im Rahmen der technischen Möglichkeiten ein minimaler CO-Gehalt bei größtmöglichem CO_2-Gehalt im Abgas angestrebt. Die Einstellung der Hackgut-Feuerungsanlage erfolgte im wesentlichen durch Anpassung der Takt- und Pausenzeit der Zufuhrschnecke und der Mindestdrehzahl der beiden Verbrennungsluftgebläse an die erforderliche Wärmeleistung.

3.6.2 Durchführung der Verbrennungsversuche

Die Verbrennungsversuche wurden nach Abschluss der Vorbereitungen über den Zeitraum von Ende Mai 2000 bis Anfang August 2000 in enger Kooperation mit dem Projektpartner (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart) durchgeführt. Die Durchführung wird nachfolgend beschrieben.

Anheizen und Beharrungszustand. Nach dem Befüllen des Tagesvorratbehälters oder Brennstofffüllraumes mit dem Versuchsbrennstoff wurde die Feuerungsanlage eingeschaltet und damit das Zündprogramm der elektronischen Verbrennungsregelung gestartet. Bei den beiden automatischen Anlagen leitete die Steuerung die automatische Zündung ein. Der Stückholzkessel wurde von Hand mit einem elektrischen Heißluftgebläse gezündet.

In der Phase des Anheizens erfolgte lediglich eine Zirkulation des Heizwassers im Kühlkreislauf. Die Kaltwassereinspeisung setzte erst ab einer Kesselwassertemperatur von ca. 60 °C ein. Dabei wurde der Kaltwasserdurchfluss auf die im Beharrungszustand erforderliche Wärmeleistung eingeregelt. Die Vorlauftemperatur lag gemäß DIN EN 303-5 /6/ im Mittelwert zwischen 70 und 90 °C, und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf betrug 10 bis 25 K.

Der Beharrungszustand war erreicht, nachdem die Betriebs- und Abgasparameter einen annähernd gleichmäßigen Verlauf auf dem für die jeweilige Anlage charakteristischen Niveau zeigten. Bei den durchgeführten Verbrennungsversuchen lag diese Dauer bei etwa einer Stunde.

Durchführung der Messungen. Bei den automatisch beschickten Feuerungsanlagen wurde der Brennstoffvorratsbehälter nach Erreichen des Beharrungszustands mit einer ausreichenden Brennstoffmenge befüllt. Alle automatischen Reinigungsmechanismen der Feuerungsanlage (z. B. Wirbulatorschnecken, Ascheräumer auf dem Rost, Kipprost, Ascheaustragung) wurden über die Dauer der Probenahme abgeschaltet.

Anschließend wurde die Messwertaufzeichnung gestartet und die Feinstaubprobenahme durchgeführt. Die Gesamtdauer der Messung richtete sich nach der Dauer der Impaktor-Probenahme. Zu jeder Feinstaub-Probenahme wurden zwei Gesamtstaubmessungen durchgeführt. Zu jeder Versuchsvariante erfolgte eine weitere Wiederholungsmessung über die gleiche Dauer und unter gleichen Betriebsbedingungen.

Bei den beiden manuell beschickten Stückholzkesseln wurde nach Erreichen des Beharrungszustandes (Ende der ersten Auflage) eine für die Probenahme ausreichende Brennstoffmenge nachgelegt. Hierbei wurde in Anlehnung der 1. BImSchV /15/ der Beginn der Probenahme auf den Zeitpunkt 5 Minuten nach dem Auflegen gelegt.

Um eine messbare Belegung der Trennstufen sicherzustellen, wurde versucht, die Feinstaubprobenahme so lange wie möglich aufrecht zu erhalten, bis sich erste Anzeichen der Beladungsgrenze durch einen deutlichen Druckanstieg zeigten. Dieser Druckanstieg wird durch das Erreichen der Beladungsgrenze des Endfilters verursacht.

Beim Stückholzkessel kam es bei kleinster Wärmeleistung aufgrund von Brückenbildung des Prüfbrennstoffs zu Störungen im Verbrennungsprozess. Dies äußerte sich durch eine erhöhte Emission an Bestandteilen der unvollständigen Verbrennung, was die Standzeit des Endfilters wesentlich verkürzte. Somit konnte bei dieser Leistungsstufe in der Regel keine vollständige Brennstoffauflage beprobt werden. Aus diesem Grund wurde ein zusätzlicher Versuch mit Buchenscheitholz bei kleinster Wärmeleistung durchgeführt, damit der Vielfalt der möglichen Praxisbrennstoffe auf diese Weise zumindestens ansatzweise Rechnung getragen werden konnte.

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. Versuchstages rund 9 Stunden (beim Hackschnitzel- und Pelletkessel) bzw. bis 12 Stunden (beim Scheitholzkessel).

Laststufenabsenkung. Als Heizlaststufen wurden 100 % (Nennwärmeleistung, NWL) und eine kleinste Wärmeleistung (KWL) gewählt, letztere wurde nicht nach den entsprechenden Angaben der Hersteller sondern nach den für die Feuerungsbauart typischen Werten festgelegt. Bei den automatisch beschickten Kesseln wurde zusätzlich eine "mittlere Wärmeleistung" (MWL) angesteuert. Die tatsächlich erreichten Laststufen können versuchsbedingt leicht über oder unter den Zielwerten liegen; entsprechend werden die Mittelwerte der tatsächlich erreichten Heizlaststufen in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9 Gemessene Laststufen und Lastschwankungen bei den Wiederholungen. NWL: Nennwärmeleistung; MWL mittlere Wärmeleistung; KWL kleinste Wärmeleistung

Bezeichnung	NWL (Ziel)	erreichte Leistung für NWL		MWL (Ziel)	erreichte Leistung für MWL		KWL[1] (Ziel)	erreichte Leistung für KWL	
	(kW)	(kW)	in % der NWL	(kW)	(kW)	in % der NWL	(kW)	(kW)	in % der NWL
Stückholzkessel "modern"	30	28,6 (27,7-29,4)	95,3	---	---	---	15	15,7 (15,5-15,9)	52,3
Stückholzkessel "alte Technik"	33	31,1 (30,3-31,9)	94,2	---	---	---	15	24,1 (23,5-24,6)	73,0
Hackgutkessel w=15%	50	52,9 (52,9-53,0)	106,0	30	32,6 (32,6-32,7)	65,3	15	14,4 (13,6-15,3)	28,8
Hackgutkessel w=35%	50	47,8 (46,5-49,1)	95,6	30	30,6 (30,5-30,8)	61,3	15	13,1 (13,1)	26,1
Pelletkessel	15	15,1 (15,1-15,2)	101,0	10	9,9 (9,6-10,3)	66,2	5	5,3 (5,3-5,4)	35,7

[1] nicht nach Herstellerangaben sondern nach bauarttypischen Werten festgelegt

Für die Interpretation der Ergebnisse der Hackgutfeuerung sei hier auf eine Besonderheit bei der Betriebsweise hingewiesen. Während die Leistungsstufen NWL und MWL im (fest voreingestellten) kontinuierlichen Betrieb gefahren werden konnten, ließ sich die kleinste Laststufe nur durch einen intermittierenden Betrieb, d. h. durch einen Betrieb mit ständigem Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb), einstellen. Derartige Betriebsweisen sind in der Regel mit negativen Folgen für das Niveau des Schadstoffausstoßes verbunden (Kapitel 4.1.1).

Wassergehaltsänderung. Bei den Versuchen zum Wassergehaltseinfluss in der Hackschnitzelfeuerung 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 (w = 35 %) 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.

3.7 Auswertung der Abgas- und Feinstaubuntersuchungen

Zur Auswertung und Verrechnung der Mess- und Analysedaten wurde die an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelte Auswertungsdatei FMDA 9.3 sowie die am IVD Stuttgart entwickelte Impaktor-Auswertungsdatei IMPAUS (Stand 09/00) zusammen mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel 5.0 verwendet. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

3.7.1 Abgas

Schadstoffemissionen. In einem ersten Auswertungsschritt wurden die Abgaskenngrößen Luftverhältniszahl, Normdichte, Normvolumenstrom und Massenstrom als Minutenmittelwerte aus den Messwerten berechnet. Anschließend wurden Mittelwerte der be-

rechneten und gemessenen Werte über die Dauer der Impaktor- und Staubprobenahme gebildet. Sämtliche erfassten Schadstoffemissionen wurden sowohl als Massenkonzentrationen (mg/Nm³ bei Bezugszustand 13 % O_2), als auch als energiemengenbezogene Emissionen (mg/MJ $H_{u(roh)}$) ausgewiesen.

Die C_nH_m-Emissionen wurden als organisch gebundener Kohlenstoff (Gesamt-C bzw. VOC) bezogen auf trockenes Abgas und die NO_x-Emissionen als NO_2 angegeben. Neben der tabellarischen Ausgabe in formatierten Datenblättern erfolgte eine grafische Darstellung ausgewählter Messgrößen als Zeitverläufe (s. Anhang).

Wärmeleistung und Wirkungsgrad. Mit den Daten zur Brennstoffzusammensetzung und den Momentanwerten der Abgaskenngrößen, Temperaturen und Wasserverbrauch erfolgte die Berechnung der Kessel- und Feuerungswärmeleistung, des feuerungstechnischen Wirkungsgrads und des Kesselwirkungsgrads (nach der direkten Methode) gemäß den Berechnungsvorgaben der DIN EN 303-5 /6/. Dazu wurden der Kühlwasservolumenstrom und dessen Temperatur im Kesseleingang und Vorlauf kontinuierlich erfasst sowie die verbrauchte Brennstoffmasse bestimmt.

Die Mittelwertbildung der Momentanwerte wurde wie bei den Schadstoffemissionen über die Dauer der Impaktorprobenahme durchgeführt. Die Ergebnisausgabe erfolgte tabellarisch in formatierten Datenblättern.

3.7.2 Feinstaub und Gesamtstaub

Gesamtstaubgehalt. 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. Aus mehreren Gesamtstaubprobenahmen (mindestens zwei) wurde über die Dauer einer Impaktorprobenahme ein zeitlich gewichteter Mittelwert des Staubausstoßes gebildet.

Die Filtermedien wurden im Trockenschrank bei 240 °C eine Stunde lang ausgeheizt. Anschließend wurden sie im Exsikkator über eine weitere Stunde abgekühlt und konditioniert. Danach wurden sie einzeln entnommen und mit einer Präzisionswaage gewogen und bis zur weiteren Verwendung staubfrei gelagert. 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.

Feinstaubgehalt. Die Auswertung der Feinstaubprobenahme erfolgte analog zur Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes mit der vom IVD Stuttgart entwickelten Auswertungsvorlage. Die Gesamtstaubmenge der Feinstaubprobenahme ergab sich aus der Summe der auf den einzelnen Impaktorstufen bestimmten Staubmengen. Dieser Summenwert ermöglicht eine Einschätzung über die Partikelverluste im Impaktor. Über die Höhe dieser Verluste, die wesentlich von der Bauart des Impaktors und von den Eigenschaften der Partikel abhängen, werden hier jedoch keine Auswertungen vorgestellt; statt dessen sei hierzu auf die umfangreichen Ergebnisse weiterführender messtechnischer Vergleichsuntersuchungen hingewiesen (z. B. /14/).

Die Verlustanteile aus der Schwanenhalssonde und im Konus wurden zusätzlich getrennt erfasst. Sie wurden jedoch nicht in die weitere Auswertung des Feinstaubgehaltes mit aufgenommen (siehe Anhang „Randbedingungen bei der Partikelprobenahme").

Da zu jeder Versuchsvariante 2 bis 3 Impaktorprobenahmen durchgeführt wurden, konnte aus den Einzelmessungen eine Mittelwertbildung erfolgen. Als Bedingungen für die Berücksichtigung einer Einzelmessung wurden festgelegt:

- vergleichbare Verbrennungsbedingungen während der Impaktorprobenahme,
- fehlerlose und störungsfreie Abgasprobenahme,
- relative Abweichung der Trenngrenze vom Mittelwert bei weniger als 10 % für jede Impaktorstufe,
- Abweichung der Einzelwerte (in %) vom Mittelwert (in %) bei weniger als 5 % für jede Impaktorstufe.

Die Detaildaten sind in einer eigenen Datendatei zusammengestellt.

Die Ergebnisse wurden als Massenkonzentration, Säulendiagramme und als Summenkurve dargestellt. Die Partikelgrößenanteile wurden zudem für die übliche Angabe von PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} zusammengefasst.

3.7.3 Brennstoffe

In den Auswertungen wurde der nach DIN 51 718 /11/ bestimmte Wassergehalt berücksichtigt (Tabelle 7, S. 218). Bei den Auswertungen wurden außerdem die Elementgehalte für C, O, H, S und N als Tabellenwerte hinterlegt. Diese in der Verbrennungsrechnung verwendeten Werte sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Elementgehalte der verwendeten Brennstoffe

Brennstoffart	Heizwert H_u	Elementgehalte, bezogen auf die Trockenmasse (TM) (kg/kg TM)				
	(kJ/kg TM)	C	O	H	S	N
Buchenholz mit Rinde	18 420	0,4790	0,4521	0,0620	0,0002	0,0022
Fichtenholz mit Rinde	18 820	0,4974	0,4325	0,0627	0,0002	0,0013
Holzpellets	19 076	0,4696	0,4602	0,0645	0,0015	0,0007

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einfluss auf Standardemissionsgrößen (CO, VOC, Gesamtstaub)

Unter den Standard-Emissionsgrößen werden nachfolgend die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO), organische gasförmige Stoffe (VOC) und Partikelmasse (Staub) zusammengefasst. Die Parameter Kohlenmonoxid und Gesamtpartikelmasse bilden oft die Basis für die feuerungstechnische Beurteilung von Feuerungsanlagen; in Tabelle 11 sind diese Emissionsergebnisse differenziert nach Feuerungsanlage, Brennstoff und Leistungsstufe zusammengefasst. Die ebenfalls gemessenen NO_x-Emissionen sowie die feuerungstechnischen Wirkungsgrade und die Kesselwirkungsgrade finden sich in Anhang 7.1.3 (Tabelle 18).

Tabelle 11 Übersicht über die Messergebnisse zu den Emissionsparametern CO, VOC und Gesamtstaub. NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinster Wärmeleistung

Feuerungstyp	Brennstoff	CO			VOC[1]			Gesamt-Staub		
		mg/Nm³ bez. auf 13% O_2								
		NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL
Stückholzkessel, "modern"	Fichtenscheite	324	---	1 326	9,1	---	219	35,5	---	20,5
	Buchenscheite[2]	---	---	494	---	---	20	---	---	13,2
Stückholzkessel, "alte Technik"	Fichtenscheite	4 724	---	4 537	386	---	416	143	---	189
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	200	52	1 092	1,0	1,0	94,0	31,0	22,0	28,5
	Hackgut w = 35 %	196	48	2 374	1,7	1,0	115	17,0	12,0	30,0
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	65	51	101	2,2	5,4	11,0	20,0	15,0	15,0

[1] berechnet für trockenes Abgas
[2] Zusatzversuch aufgrund von Brückenbildung bei Fichtenscheitholz

Eine Probenahme mit Buchenscheitholz wurde zusätzlich bei kleinster Wärmeleistung durchgeführt, da bei dieser Leistungsstufe mit Fichtenscheitholz Störungen im Abbrandverlauf durch Brennstoffbrückenbildung aufgetreten waren. Deutliche Unterschiede zwischen den Auswirkungen sind hierbei besonders im erhöhten Kohlenmonoxidgehalt zu erkennen.

4.1.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abb. 10 zeigen, dass die CO-Emission moderner Holzfeuerungen bei den Leistungsstufen Nennwärmeleistung (NWL) und mittlere Wärmeleistung (MWL) mit Werten von meist unter 200 mg/Nm³ auf einem relativ niedrigen Niveau liegen, verglichen mit dem derzeit gültigen Grenzwert der 1. BImSchV /15/, der bei 4 000 mg/Nm^3 und damit bei deutlich mehr dem 10-fachen der gemessenen Werte liegt. Wie erwartet sind die CO-Emissionen beim Pelletkessel in der Regel am günstigsten. Das ist auf die vorteilhafte Brennstoffstruktur zurückzuführen, die unter anderem eine sehr gleichmäßige Beschickung erlaubt; außerdem ist der Wassergehalt im Brennstoff, der hier bei 8 % lag, besonders niedrig.

Auffällig ist außerdem, dass der Anlagenvergleich beim Kohlenmonoxid besonders deutlich zu Gunsten des Pelletkessels ausfällt, wenn nur die Ergebnisse für den kleinsten Wärmeleistungsbereich betrachtet werden. Hier ist bei Scheitholz aber auch bei Holzhackschnitzeln mit Nachteilen zu rechnen, so dass diese Betriebszustände nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Das kann zum Beispiel durch Verwendung eines ausreichend großen Pufferspeichers erfolgen.

Beim Vergleich der Teillastbetriebszustände darf allerdings nicht übersehen werden, dass die Hackschnitzelfeuerung und die Pelletfeuerung mit ca. 30 bis 35 % der Nennwärmeleistung eine größere Lastabsenkung erreicht, als die Stückholzfeuerung ("modern"), deren kleinste Wärmeleistung bei über 50 % der Nennwärmeleistung lag (vgl. Tabelle 9, S. 228). Zudem hatte sich der Brennstoff Fichtenholz als besonders problematisch erwiesen, da er bei starker Lastabsenkung besonders zur Brückenbildungsneigung im Feuerraum neigt. Diese Beobachtung kann hier zum größten Teil für das relativ hohe Emissionsniveau beim Kohlenmonoxid verantwortlich gemacht werden. Das wird durch den speziell aus diesen Gründen durchgeführten Zusatzversuch mit Buchenscheitholz belegt. Bei Buchenholz treten Brückenbildungen wesentlich seltener auf, so dass der CO-Ausstoß allein durch den Wechsel der Holzart bei kleinster Wärmeleistung um mehr als 60 % abgesenkt werden kann (vgl. hierzu Tabelle 11). Bei Feuerungen, die häufig in diesem ungünstigen Lastbereich betrieben werden (z. B. infolge zu geringer Wärmespeichervolumina), ist dieser Brennstoff daher zu bevorzugen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Hackschnitzelfeuerung im Teillastbetriebszustand (MWL, KWL) ist eine anlagentechnische Besonderheit zu beachten. Die kleinste Leistungsstufe wird hier bauartbedingt durch einen intermittierenden, d. h. durch einen Betrieb mit ständigem Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb), eingestellt. Dadurch ergeben sich zwangsläufig inkonstante Verbrennungsbedingungen mit entsprechenden Nachteilen beim Schadstoffausstoß. Allerdings ist dieses besonders ungünstige Teillastverhalten nicht als typisch – auch nicht für den gewählten Anlagentyp – anzusehen.

Im Gegensatz zur kleinsten Wärmeleistung stellt der mittlere Leistungsbereich bei Holzhackgut den günstigsten Betriebszustand für die untersuchte Anlage dar; hier besteht sogar Gleichstand zu dem CO-Ausstoß des Pelletkessels.

Die gemessenen Ergebnisse für die organischen Stoffe (VOC) ergeben eine analoge Tendenz zu den Kohlenmonoxidemissionen und werden daher in Abb. 10 nicht gesondert dargestellt. Sie sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Gesamtstaub-Emission. Die Gesamtstaub-Emissionen liegen ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau. Mit Werten um oder unter 30 mg/Nm^3 unterschreiten sie den derzeit gültigen Grenzwert der 1. BImSchV (150 mg/Nm^3) deutlich. Wie erwartet weist auch hier der Pelletkessel die niedrigsten Staubemissionen auf; das liegt daran, dass es sich bei den Holzpellets um einen besonders aschearmen Brennstoff handelt, da dieser in der Regel aus entrindetem Material hergestellt wird.

Anders als bei den CO-Emissionen sind die anlagenbedingten Unterschiede beim Staubausstoß insgesamt relativ gering, zumal sie kaum wesentlich über den üblichen Messwertschwankungen liegen. Vor allem zwischen der Hackgutfeuerung und dem Scheitholzkessel sind keine nennenswerten Veränderungen erkennbar; hier war der gleiche Brennstoff lediglich in unterschiedlicher Aufbereitungsform verwendet worden.

Die gemessenen Unterschiede beim Staubausstoß sind demnach offenbar weniger auf die Anlagenbauart als vielmehr auf die Laststufe zurückzuführen. Die mittlere und kleinste Leistungsstufe ergaben erwartungsgemäß niedrigere Staubemissionen als die Versuche bei Nennwärmelast. Diesen generellen Trend bestätigen auch die in einem anderen Vorhaben an der Landtechnik Weihenstephan durchgeführten Untersuchungen, die in der Mehrzahl der Messungen eine sichtbare Absenkung des Staubausstoßes während des Teillastbetriebes zeigten /31/.

Beim Hackgutkessel ist der Wiederanstieg bei der kleinsten Wärmeleistung vermutlich auf die intermittierende Betriebsweise (siehe oben) zurückzuführen.

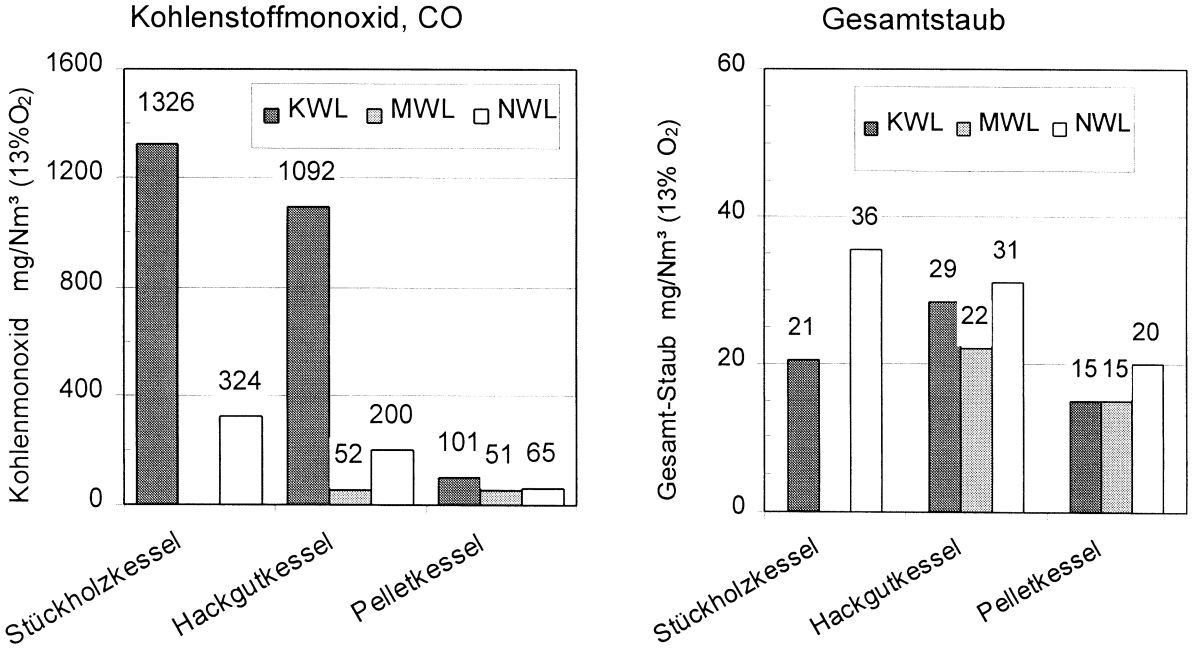


Abb. 10 Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL: Nennwärmeleistung (Scheitholzkessel: 30 kW, Hackgutkessel: 50 kW, Pelletkessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW)

4.1.2 Entwicklungsstand

Für die Betrachtung unterschiedlicher technologischer Entwicklungsstände wurde ein moderner gebläsebetriebener Stückholzkessel (vgl. Kapitel 3.2.1) mit einem naturzugbetriebenen Stückholzkessel älterer Bauart verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Ergebnisse dieser Verbrennungsversuche sind in Abb. 11 für die Abgas-Emissionsgrößen CO und Staub dargestellt. Zusammen mit den VOC-Emissionen sind alle Einzelergebnisse in Tabelle 11 ablesbar.

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abb. 11 zeigen, dass die CO-Emission bei der alten Verbrennungstechnik um ein Mehrfaches über den Werten des modernen Kessels liegen. Bei dem für die Anlagebeurteilung wichtigen Nennwärmeleistungsbetrieb überschreiten sie die Emission des modernen Kessels sogar um mehr als das 14-fache. Diese Unterschiede lassen sich vor allem durch die Tatsache erklären, dass – im Unterschied zum "modernen" Scheitholzkessel – diese Feuerung weder über ein Zuluftgebläse noch über eine räumliche Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung verfügt, da die Wärmetauscherflächen die unmittelbare Abgrenzung des Feuerraumes bilden. Dadurch werden die Flammen und Brenngase bereits während der Verbrennung abgekühlt, so dass ein möglichst vollständiger Ausbrand nicht erfolgen kann und statt dessen ein hoher Anteil unverbrannter Bestandteile im Abgas mitgeführt wird. Das ist nicht nur am Kohlenmonoxidausstoß abzulesen, sondern auch an der VOC-Emission, die bei Nennwärmeleistung auf mehr als das 35-fache der modernen Feuerung ansteigt (Tabelle 11).

Die Verringerung der Laststufe (von 100 % auf 73 %, vgl. Tabelle 9, S. 228) wirkt sich dagegen beim Altkessel angesichts des ohnehin hohen Emissionsniveaus nicht weiter nachteilig auf den CO-Ausstoß aus. Beim modernen Kessel ist er vor allem auf die Brückenbildung im Feuerraum zurückzuführen, die aber brennstoffabhängig ist und bei Verwendung von Buchenholz in der Regel nicht auftritt (vgl. CO-Emissionen in Tabelle 11). Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden in Abb. 11 jedoch die ungünstigen Teillastergebnisse aus dem Fichtenholzversuch dargestellt, hier war die gleiche Brennstoffcharge wie in der Altanlage eingesetzt worden.

Gesamtstaub-Emission. Auch die Gesamtstaub-Emissionen liegen beim Altkessel mit etwa dem 4-fachen (NWL) bzw. dem 9-fachen (KWL) deutlich über denen des modernen Scheitholzkessels. Untypisch für modernere Scheitholzkessel ist allerdings der Anstieg im Teillastbetriebszustand (KWL).

Die Deutlichkeit, mit der die Staubwerte sich hier bei den beiden "technologischen Reifezuständen" der Feuerung unterscheiden, weist auf das Vorhandensein erhöhter Kondensatmengen im Abgas des Altkessels hin. Durch die im Verdünnungstunnel stattfindende Abkühlung fallen Kohlenstoff (Ruß) und teerhaltige Bestandteile als Partikelmasse an, die als Staubemission gemessen wird.

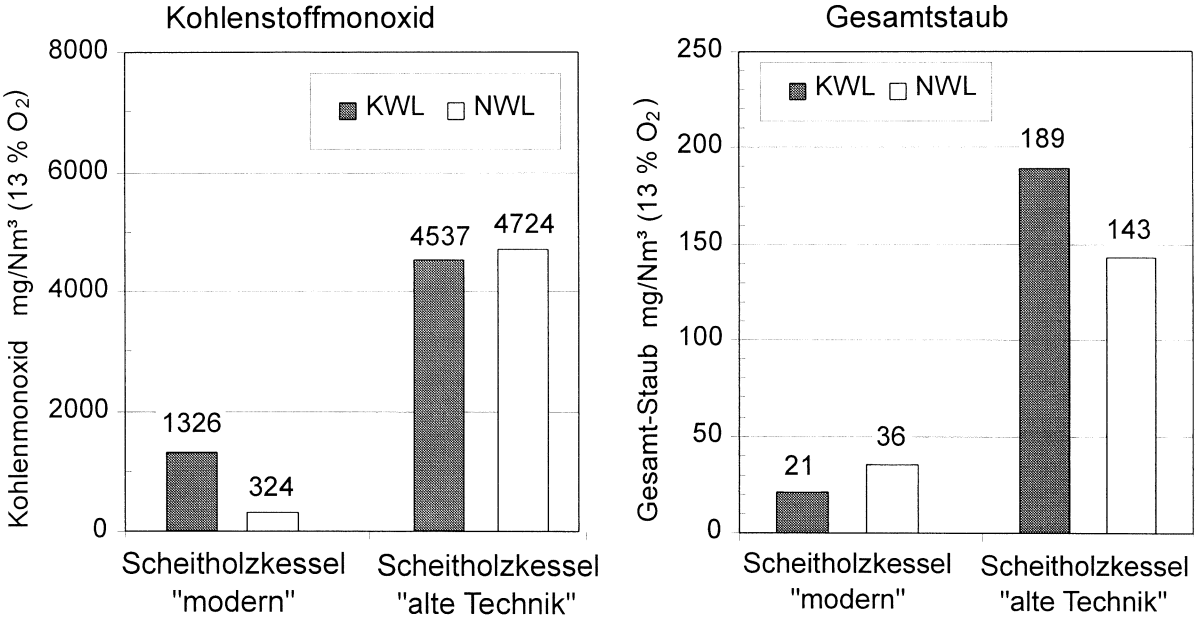


Abb. 11 Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den Scheitholzkesseln moderner und alter Bauart. NWL: Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW) KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)

4.1.3 Brennstoffwassergehalt

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abb. 12 zeigen, dass die CO-Emission bei den beiden Laststufen mit kontinuierlicher Betriebseinstellungen (NWL und MWL) bei beiden Wassergehaltsstufen stets am geringsten sind. Unterschiede, die auf den Wassergehalt zurückzuführen sind, zeigen sich nicht; offenbar besteht innerhalb der untersuchten Wassergehaltsspanne eine hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde Brennstofffeuchten. Das gilt jedoch nicht für die kleinste Wärmeleistung, die im vorliegenden Fall durch eine intermittierende Betriebsweise, d. h. durch einen ständigen Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb) erreicht wurde. In diesem Betriebszustand wirken sich höhere Wassergehalte überproportional stark nachteilig aus.

Die Vorteile der mittleren Laststufe gegenüber dem Nennleistungsbetriebszustand deuten darauf hin, dass die Feuerraumgeometrie und -größe bei dieser Anlage für eine unterhalb der Nennwärmeleistung liegende Auslastung ausgelegt ist. Hier wirkt sich offen bar die gängige Praxis der Hersteller aus, bei der abgestufte Anlagenleistungen innerhalb einer angebotenen Baureihe häufig lediglich durch veränderte Wärmetauschergrößen erzielt werden. Der aus Sicht der Verbrennungsqualität optimale Heizlastpunkt kann sich somit von der sonst allgemein üblichen Nennwärmeleistung in Richtung des Teillastbetriebszustands verschieben.

Analog zu den Kohlenmonoxidemissionen verhalten sich auch die VOC-Emissionen (vgl. Tabelle 11), allerdings sind die Nachteile beim Betrieb mit kleinster Wärmeleistung nochmals deutlich größer, als bei den beiden übrigen Laststufen, bei denen eine kontinuierliche Betriebsweise möglich war.

Gesamtstaub-Emission. Beim Gesamtstaub liegen die Emissionen bei der trockenen Brennstoffvariante tendenziell höher, als bei der feuchten, wobei in beiden Fällen die mittlere Laststufe (MWL) am günstigsten war. Inwieweit bei der kleinsten Wärmeleistung bereits Partikel aus unverbrannten Abgasbestandteilen anfallen, kann aufgrund des vorliegenden Datenmaterials nicht festgestellt werden. Insgesamt jedoch ist das Niveau des Staubausstoßes relativ niedrig, und die gemessenen Unterschiede liegen kaum wesentlich über den üblichen Messwertschwankungen.

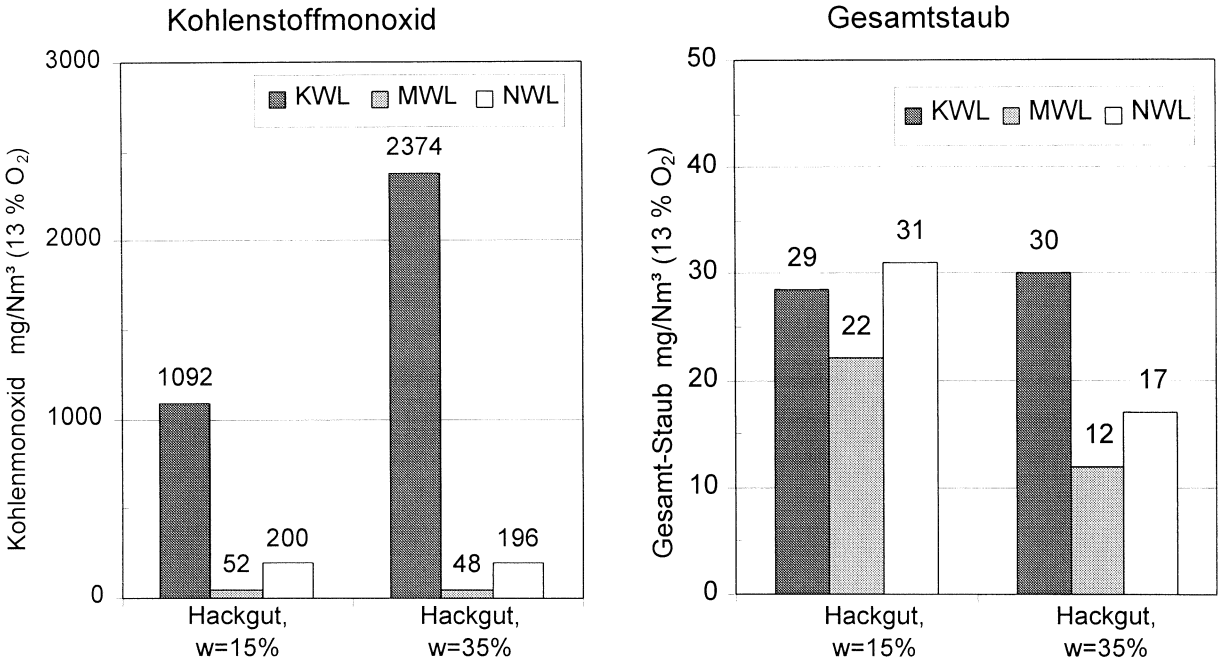


Abb. 12 Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL: Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW)

4.2 Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung der Staubemission

Da der Probengasvolumenstrom bei den Messungen stets in unterschiedlichem Maß schwankt, ergeben sich auch für die jeweiligen Trenngrenzen der Partikelgrößenklassen uneinheitliche Werte, so dass die gemessenen Korngrößenangaben nicht unmittelbar vergleichbar sind. Durch Interpolation können jedoch die abgeschiedenen Mengen für bestimmte Ziel-Korngrößen errechnet werden; beispielsweise werden im Bereich des Emissionsschutzes häufig Grenzwerte für die aerodynamischen Partikeldurchmesser von $\leq 1{,}0$ µm (PM_1), $\leq 2{,}5$ µm ($PM_{2,5}$) und ≤ 10 µm (PM_{10}) festgelegt. Diese Interpolationsergebnisse ermöglich einen direkten Vergleich einzelner Messwerte; sie sind für sämtliche hier durchgeführte Messungen in Form der Mittelwerte aus je zwei Wiederholungen in Tabelle 12 vollständig dargestellt.

Tabelle 12 Anteile der im Impaktor abgeschiedenen aerodynamischen Partikeldurchmesser bis 1, 2,5 bzw. 10 µm (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}). Dargestellt sind die Mittelwerte für die Versuchsvarianten aus jeweils zwei Messungen

		Anteile der Partikelmasse in % der abgeschiedenen Gesamt-Partikelmasse[1)]								
Feuerungstyp	Brennstoff	NWL			MWL			KWL		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Stückholzkessel, "modern"	Scheite (Fichte)	34,5	46,2	78,7	---	---	---	69,0	76,7	93,5
	Scheite (Buche)	---	---	---	---	---	---	76,9	81,9	91,4
Stückholzkessel[1)], "alte Technik"	Scheite	78,9	88,9	96,7	---	---	---	82,4	89,7	96,8
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	89,2	91,5	95,8	92,9	95,5	99,4	84,4	88,7	96,0
	Hackgut w = 35 %	64,5	66,5	78,5	89,8	92,6	97,5	84,6	88,8	96,5
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	62,4	68,4	94,6	89,0	91,6	98,7	91,1	93,9	99,1

[1)] Mittelwerte über jeweils zwei Probenahmen

Aufgrund der besonderen Problematik der kleinsten Abgaspartikel (vgl. Kapitel 1) konzentrieren sich die nachfolgenden Betrachtungen auf den Partikelgrößenbereich, der als "Submikronpartikel" (aerodynamischer Partikeldurchmesser $d_{ae} < 1$ µm) definiert ist.

In den nachfolgenden Kapiteln 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3 werden Einflüsse der Anlagenart und der Laststufe sowie des technologischen Entwicklungsstandes und des Wassergehalts separat anhand der grafischen Darstellungen der Partikelgrößenverteilungen (Abb. 13, Abb. 15 und Abb. 16) vorgestellt und diskutiert. Darin werden die impaktierten Partikelmassenanteile als Verteilungssummen in Abhängigkeit vom aerodynamischen Partikeldurchmesser dargestellt (siehe Erläuterungen in Kapitel 3.7.2).

4.2.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss

Beim Einsatz von Scheitholz (im "modernen" Heizkessel) ist der Anteil sehr feiner Stäube deutlich geringer als bei den Schüttgutbrennstoffen Hackschnitzel und Pellets. Beim Scheitholz tragen die Submikronteilchen im Nennwärmelastzustand nur etwa 35 % zur Gesamt-Partikelmasse bei, während bei vergleichbaren Heizlaststufen eines Pellet- bzw. Hackschnitzelkessels zwischen 62 und 89 % auf diese Korngrößenklasse entfallen (Tabelle 12).

Diese Beobachtung lässt sich auch anhand des Verlaufs der Partikelgrößenverteilung in Abb. 13 ablesen. In beiden Laststufen (NWL und KWL) weist die Scheitholzfeuerung den geringsten Anteil feiner Partikel auf; allerdings verringern sich die Unterschiede mit der Heizlast tendenziell. Bei Holzhackgut ist der Anteil der feineren Staubfraktionen in der

Regel größer als beim Pelletkessel, jedoch waren diese Unterschiede lediglich beim Nennwärmeleistungsversuch besonders ausgeprägt.

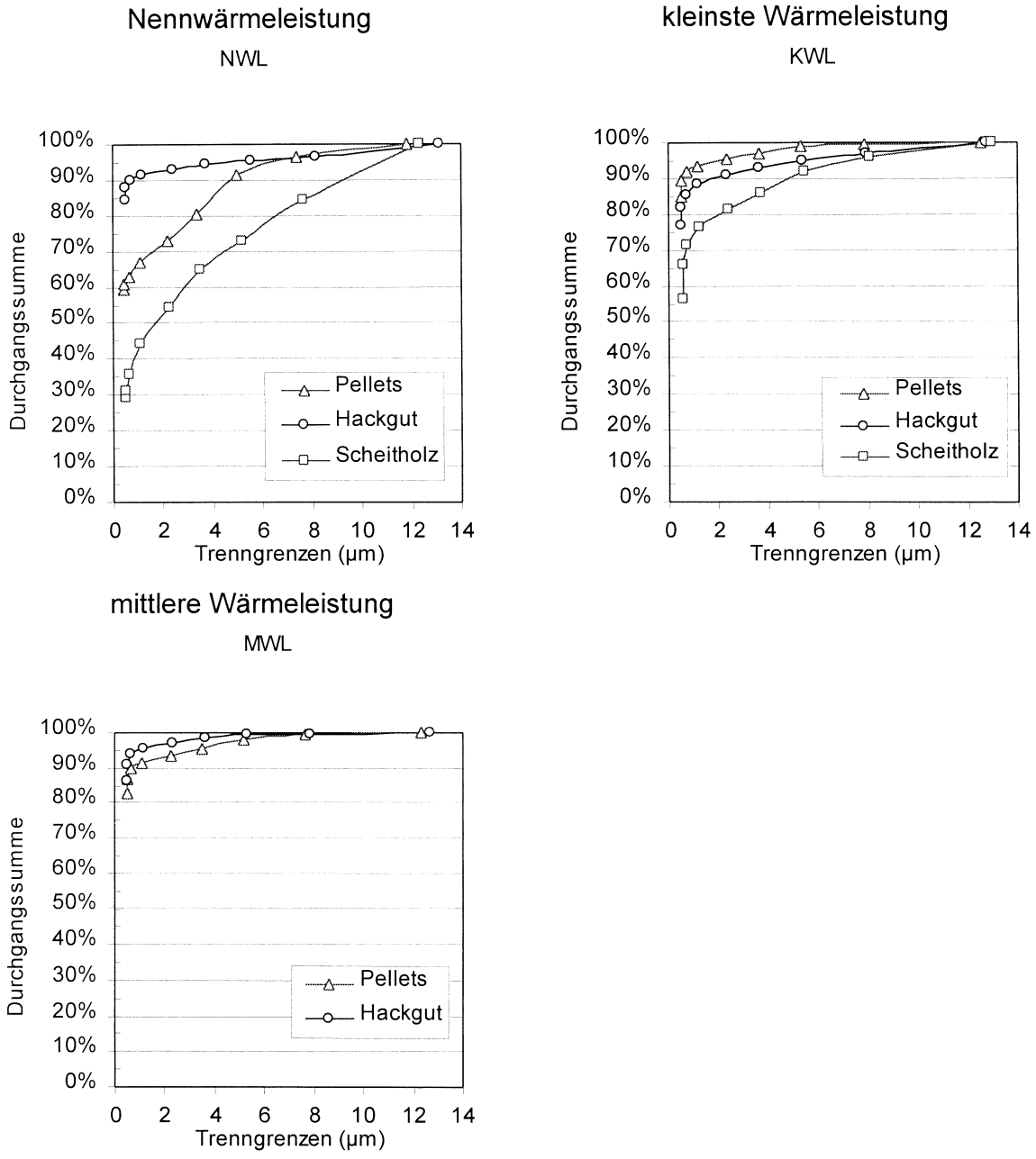


Abb. 13 Verteilungssummenkurven der gemessenen Partikelkollektive bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL Nennwärmeleistung (Scheitholzkessel: 30 kW, Hackgutkessel: 50 kW, Pelletkessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW)

Generell verschieben sich die Staubanteile bei abnehmender Wärmeleistung in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen. Besonders deutlich zeigt sich dies beim Scheitholzkessel. Bei den Schüttgutbrennstoffen (vor allem beim Holzhackgut) ist dieser Effekt dagegen geringer, er wird aber gestützt durch frühere Untersuchungen von LAUNHARDT et

al. /26/, in denen sich die Submikronfraktion (d_{ae} < 1 µm) ebenfalls bei einer 50 kW Hackgutfeuerung mit Fichtenholz durch Lastminderung von 100 % auf 30 % in anteilsmäßig etwa verdoppelte.

Eine plausible Erklärung für diesen erhöhten Anteil von Feinstpartikeln bei kleineren Leistungsstufen bietet die Tatsache, dass die zugeführte Verbrennungsluftmenge zur Absenkung der Heizlast entsprechend reduziert werden muss. Dadurch sinkt die Strömungsgeschwindigkeit in der Feuerungsanlage ab, was dazu führt, dass gröbere und damit auch trägere Partikel nicht mehr in dem Maße im Abgas mitgerissen werden. Dieser Effekt zeigt sich besonders bei der Scheitholz- und der Pelletfeuerung, die bei kleinster Wärmeleistung einen höheren Anteil an Feinstpartikeln aufweisen (Abb. 13), während gleichzeitig der Gesamt-Partikelausstoß zurückgeht.

Durchweg ist festzustellen, dass bei allen hier untersuchten Holzbrennstoffen der weitaus größte Teil der Gesamtstaubemission im Feinstaubbereich (d_{ae} < 10 µm) vorliegt und dass – mit Ausnahme des Scheitholzkessels bei Nennwärmeleistung – sämtliche Messungen ein Maximum im Submikronbereich (d_{ae} < 1 µm) aufweisen (mindestens ca. 60 bis 80 % Anteil). Diese Größenordnung für die Submikronfraktion wird durch Ergebnisse aus Messungen an größeren Biomassefeuerungen belegt, in denen die Submikronpartikel einen mindestens 80 %-igen Anteil hatten /20/ /21/. Nach früheren Untersuchungen der Landtechnik Weihenstephan kann diese Aussage auch auf biogene Nicht-Holzbrennstoffe wie Stroh, Getreideganzpflanzen oder Landschaftspflegeheu übertragen werden /26/. Bei Verwendung von Holzhackgut sind der gleichen Quelle zufolge insgesamt allerdings auch günstigere Werte, d. h. geringere Submikronpartikelanteile verglichen mit den hier berichteten Werten möglich.

Bei der Interpretation der Korngrößenverteilungsergebnisse darf allerdings nicht übersehen werden, dass es sich lediglich um Relativzahlen, d. h. um Anteile an einer Gesamtpartikelmasse handelt. Da diese Gesamtmasse ihrerseits größeren Schwankungen unterworfen ist (Kapitel 4.1), kann eine umfassende Bewertung der Anlagentypen und Einflussgrößen nur durch Betrachtung der tatsächlichen Partikelmassenemissionen der einzelnen Staubfraktionen sinnvoll erfolgen. Das erfolgt durch Multiplikation der hier dargestellten relativen Massenanteile mit dem jeweiligen in Kapitel 4.1 (Tabelle 11) dargestellten Gesamtstaubemissionswert pro Normkubikmeter.

Diese Ergebnisse solcher Berechnungen sind am Beispiel der untersuchten "modernen Feuerungen" in Abb. 14 dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Scheitholzfeuerung trotz der oben genannten geringen Anteile submikroner Teilchen (< 1 µm) bei den Gesamtemissionen dieser Größenklasse insgesamt nicht günstiger zu bewerten ist, als die Pelletfeuerung. Dagegen bleiben die Vorteile gegenüber der Hackgutfeuerung auch bei der Betrachtung der Schadstoffkonzentrationen im normierten Abgas bestehen.

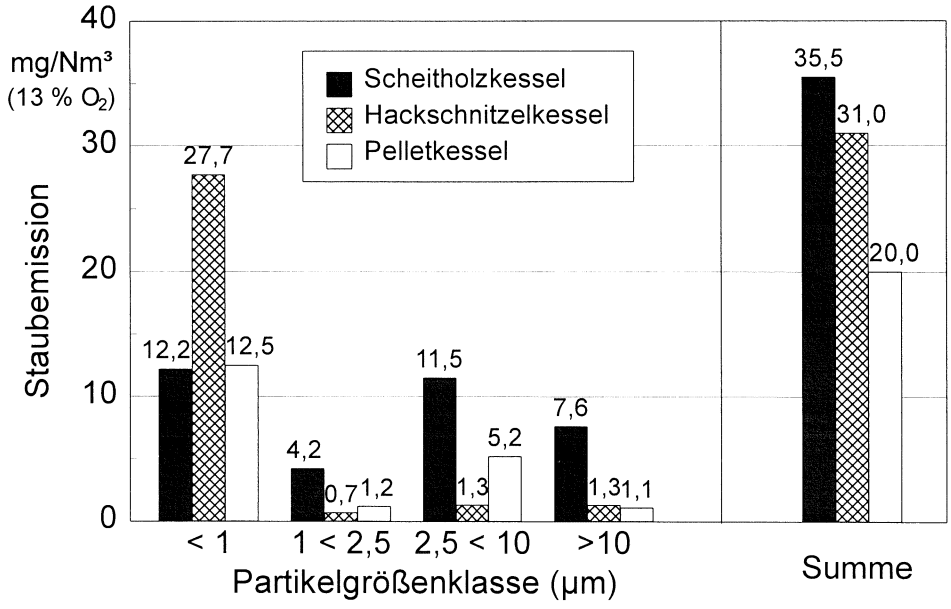


Abb. 14 Feinstaubemission moderner Holzfeuerungen, unterschieden nach Partikelgrößenklassen. Messungen bei Nennwärmeleistung mit trockenen Brennstoffen (w < 15 %)

4.2.2 Entwicklungstand

Deutliche Unterschiede bei den ausgestoßenen Partikelgrößen zeigen sich zwischen den beiden untersuchten technologischen Entwicklungsständen von Scheitholzkesseln. Während der Altkessel noch ca. 79 % Submikronpartikelanteile (d_{ae} < 1 µm) im Gesamtstaubausstoß aufweist, sinkt dieser Anteil bei der modernen Feuerung auf ca. 35 % ab (Tabelle 12).

Für die absolute Konzentration der Partikelmasse einzelner Korngrößenklassen ist allerdings die ausgestoßene Gesamtstaubmenge entscheidend. Die hohen Submikronpartikelanteile der Feuerung "alte Technik" sind nochmals um ein Vielfaches höher, wenn berücksichtigt wird, dass hier etwa 4-mal (NWL) bzw. 9-mal (KWL) soviel Gesamtstaub emittiert wird, wie bei der "modernen" Scheitholzfeuerung. Für die Submikronfraktion (< 1 µm) bedeutet dies einen Partikelausstoß von 149 mg/Nm³ bei der "alten Technik" gegenüber 7 mg/Nm³ bei der modernen Scheitholzfeuerung (bei Nennwärmeleistung). Dies errechnet sich aus dem Korngrößenanteil (Tabelle 12), der mit dem jeweiligen Gesamtstaubausstoß (Tabelle 11) multipliziert wird.

Wie schon bei den unterschiedlichen Feuerungsarten (Kapitel 4.2.1) festgestellt wird, zeigen sich bei dem Scheitholzgebläsekessel ("modern") bei abnehmender Wärmeleistung Verschiebungen in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen (Abb. 15 bzw. Tabelle 12). Auch hier bietet die Tatsache der reduzierten Verbrennungsluftmenge, die bei abgesenkter Heizlast zu einer reduzierten Abgasgeschwindigkeit führt, einen plausiblen Erklärungsansatz. Für die Scheitholzfeuerung der "alten Technik" wird eine lastabhängige Änderung der Feinstaubanteile nicht beobachtet; auch der Gesamtstaubausstoß unterscheidet sich auf dem festgestellten hohen Niveau kaum noch.

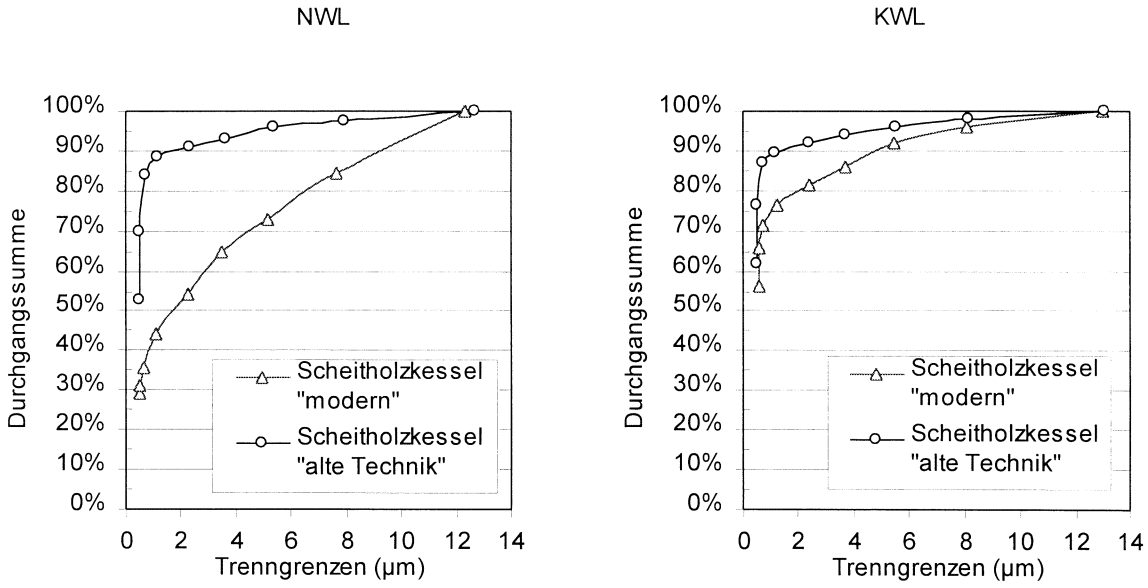


Abb. 15 Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei den Scheitholzkesseln moderner und alter Bauart. NWL Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)

4.2.3 Brennstoffwassergehalt

Die unterschiedlichen Wassergehalte, die hier lediglich bei der Hackgutfeuerung abgestuft untersucht wurden, verursachen nur sehr geringe Veränderungen bei der Korngrößenverteilung im Staubausstoß. Lediglich bei Nennwärmeleistung ist eine Verbesserung der Staubqualität beim höheren Wassergehalt festzustellen; der Submikronpartikelgehalt sinkt hier von ca. 89 auf 65 %. Dieser Abfall muss allerdings vorsichtig interpretiert werden, da in beiden Wiederholungsmessungen jeweils unverbrannte Brennstoffteilchen (Holzstaub) im Grobabscheidebereich des Impaktors festgestellt worden war; diese nicht in der Verbrennung gebildeten Grobstaubpartikel führten zu einer Höhergewichtung dieser Korngrößenklasse.

Bei den beiden übrigen Wärmeleistungsstufen war hingegen kein Einfluss des Wassergehaltes erkennbar. Das lässt darauf schließen, dass bei steigender Brennstofffeuchte nicht mit Nachteilen sondern tendenziell eher mit Vorteilen beim Gehalt der Feinstpartikel im Abgas zu rechnen ist, zumal sich auch der Gesamtpartikelausstoß eher günstiger entwickelt (vgl. Kapitel 4.1.3). Diese Aussage gilt allerdings nur unter dem Vorbehalt, dass der erhöhte Wassergehalt nicht zu einer drastisch verminderten Verbrennungsqualität mit entsprechend erhöhter Gesamtstaubbelastung durch Partikeln aus unverbrannten Rauchgasbestandteilen (z. B. Ruß, Teere) führt. Ein derartiger wassergehaltsbedingter Anstieg der CO- und Gesamtstaubemissionen geht dann oft mit höheren Anteilen gröberer Staubpartikel einher; das wurde beispielsweise bei LAUNHARDT et al. /26/ beobachtet. Die Höhergewichtung der Grobstaubpartikel kann in diesem Fall auf das vermehrte Auftreten unverbrannter Brennstoffbestandteile (Holzkohle) mit relativ großen aerodynamischen Durchmessern zwischen 5 µm und 100 µm /19/ zurückgeführt werden.

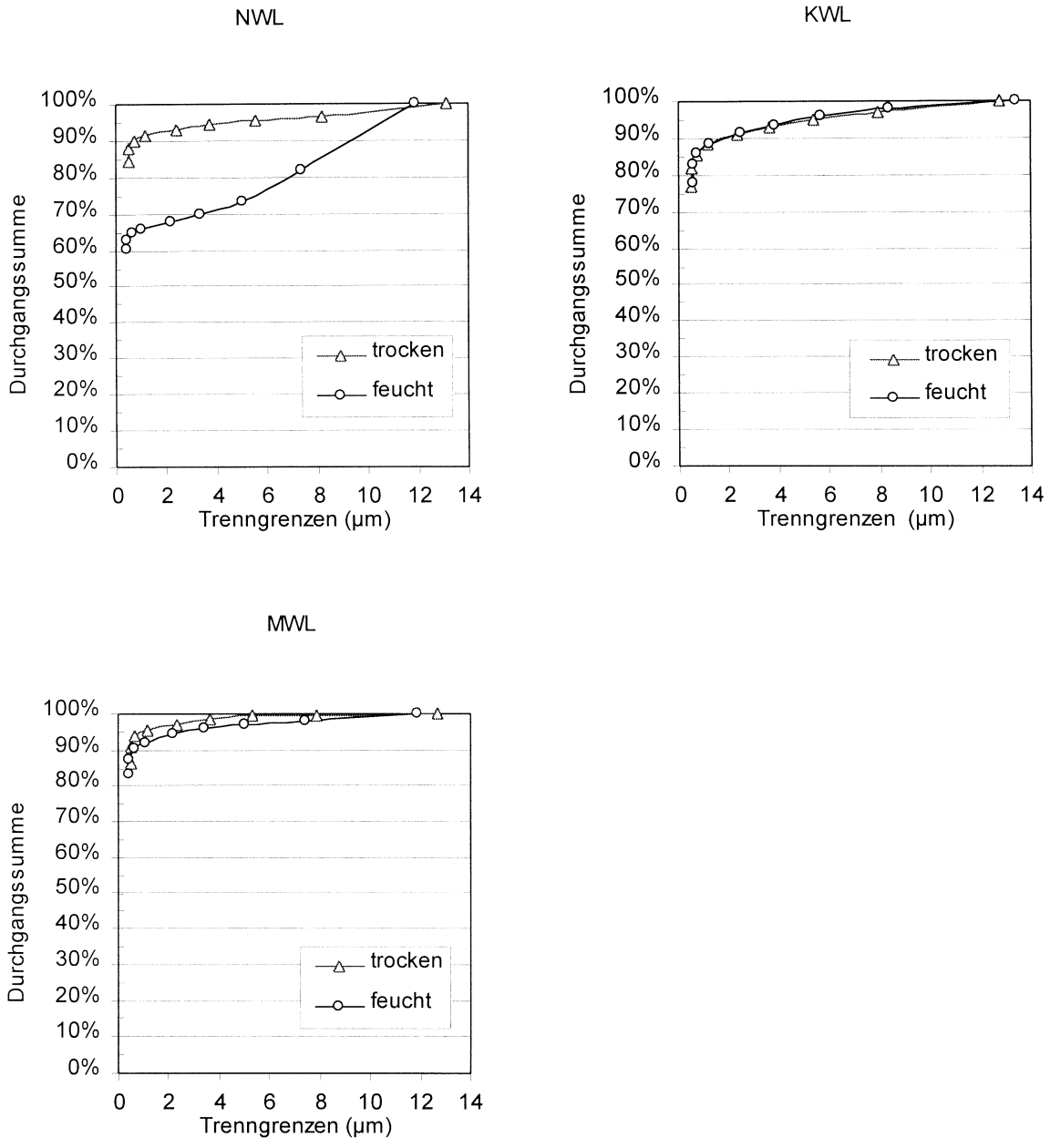


Abb. 16 Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW)

5 Zusammenfassung

Staubemissionen aus Verbrennungsprozessen sind aufgrund der Tatsache, dass sie auf ihrer Oberfläche adsorbierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle mit sich führen können, besonders kritisch. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei dem Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser (d_{ae}) von weniger als 10 µm sowie den submikronen Teilchen mit weniger als etwa 1 µm aerodynamischen Durchmesser. Letztere werden aufgrund des hohen Abscheidegrads im Lungentrakt auch als lungengängig bezeichnet. Holzfeuerungen tragen – wie alle anderen Feuerungen – ebenfalls zu solchen gesundheitlichen Belastungen bei, zumal die Gesamtstaubemissionen aufgrund des Aschegehaltes im Brennstoff relativ hoch sein können.

Um die teilweise lückenhaften Kenntnisse über die Korngrößenverteilungen bei den Flugstäuben aus Holzfeuerungen kleinerer Leistung zu schließen, wurde eine Serie von Messungen an zwei Scheitholzkesseln ("alte" und "moderne" Technik mit 33 bzw. 30 kW Nennwärmeleistung) sowie an einem 50-kW-Hackschnitzelkessel und einem 15-kW-Pelletkessel durchgeführt. Neben den "klassischen" Emissionsgrößen Kohlenmonoxid, VOC, Gesamt-Staub und NO_x wurden die Verteilungen der ausgestoßenen Flugstäube mit Hilfe eines Kaskadenimpaktors bestimmt. Die Messungen fanden bei Nennwärmeleistung (NWL) sowie bei kleinster Wärmeleistung (KWL) statt; bei den automatisch beschickten Feuerungen wurde außerdem noch eine mittlere Laststufe (MWL) untersucht. Der Wassergehalt im Brennstoff wurde lediglich bei der Hackgutfeuerung in zwei Abstufungen variiert.

Bei der "modernen" Scheitholzfeuerung, der Hackschnitzelfeuerung und vor allem bei der Pelletfeuerung wurden bei Nennwärmeleistung durchweg hohe Verbrennungsqualitäten erzielt, abzulesen an den CO-Emissionen, die meist unter 200 mg/Nm³ lagen. Sehr kleine Heizlaststufen von nur 30 bzw. 50 % der Nennwärmeleistung führten zu Nachteilen bei der Scheitholz- und Hackgutfeuerung; diese Nachteile wurden jedoch nur bei den CO-Emissionen sichtbar, während sich der Gesamt-Staubausstoß fast durchweg günstiger entwickelte. Allerdings können auch bei "modernen" Scheitholzfeuerungen Störungen im Abbrandverhalten, z.B. bei niedrigen Wärmeleistungen durch Brückenbildung im Brennstoff, auftreten, die zu einem deutlichen Anstieg der CO- und VOC-Konzentrationen führen.

Der Gesamt-Staubausstoß lag bei den "modernen" Anlagen mit Werten um oder unter 30 mg/Nm^3 ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau; an den drastisch höheren Emissionswerten für die Scheitholzfeuerung der "alten Technik" lässt sich jedoch die Wirkung der zurückliegenden technologischen Entwicklung solcher Scheitholzkessel ablesen. Durch die bei der "alten Technik" fehlenden räumlichen Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung, die Anbringung von Wärmetauscherflächen im

Feuerraum sowie durch das Fehlen eines Zuluftgebläses mit entsprechender mikroprozessorgesteuerten Regelung liegen die Gesamtstaub-Emissionen beim Altkessel mit etwa dem 4-fachen (NWL) bzw. dem 9-fachen (KWL) deutlich über denen des modernen Scheitholzkessels.

Durchweg ist festzustellen, dass bei allen hier untersuchten Holzbrennstoffen der weitaus größte Teil der Gesamtstaubemission im Feinstaubbereich, d. h. bei aerodynamischen Durchmessern (d_{ae}) von weniger als 10 µm vorliegt und dass – mit Ausnahme des Scheitholzkessels bei Nennwärmeleistung – sämtliche Messungen ein Maximum im Submikronbereich (d_{ae} < 1 µm) aufweisen. Beim Einsatz von Scheitholz (im "modernen" Heizkessel) ist der Anteil sehr feiner Stäube deutlich geringer als bei den Schüttgutbrennstoffen Hackschnitzel und Pellets; beispielsweise tragen die Submikronteilchen (PM_1) im Nennwärmelastzustand nur etwa 35 % zur Gesamt-Partikelmasse bei, während bei vergleichbaren Heizlaststufen eines Pellet- bzw. Hackschnitzelkessels zwischen 62 und 89 % auf diese Korngrößenklasse entfallen.

In der Regel verschieben sich die Feinststaubanteile bei abnehmender Wärmeleistung in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen, so dass die PM_1-Werte, d. h. die Partikelanteile (Particulate Matter) mit Korndurchmessern unter 1 µm im Teillastbetriebszustand stets über 69 % (Scheitholzkessel) 84 % (Hackschnitzelkessel) bzw. 89 % (Pelletkessel) liegen. Solche Verschiebungen zeigen sich jedoch kaum noch beim Scheitholzkessel der "alten Technik"; auch der Gesamtstaubausstoß unterscheidet sich auf dem festgestellten hohen Niveau kaum noch.

Generell ist die lastabhängige Verschiebung hin zu den kleineren Korngrößen bei allen Feuerungen auch nur dann besonders ausgeprägt, wenn sich die Verbrennungsqualität gleichzeitig mit der Heizlast deutlich verringert (z. B. gemessen am CO-Ausstoß). Analog dazu kommt es auch bei Verwendung von feuchterem Brennstoff nicht zu höheren Submikronstaubanteilen, da sich die Verbrennungsqualität in der verwendeten Hackschnitzelfeuerung – zumindest bei mittlerer Leistung und bei Nennwärmeleistung – nicht verschlechterte.

6 Quellenverzeichnis

/1/ Anonymus: Gebrauchsanleitung für Kaskadenimpaktor Anderson 2000 Inc. Mark III. Hrsg.: Klaus Schäfer Gesellschaft für Verfahrenstechnik mbH. Lange: Selbstverlag 1979, 50 S.

/2/ Anonymus: Gebrauchsanleitung für Präzisions-Kaskadenimpaktor Typ PI 1. Hrsg.: Retsch GmbH & Co KG. Haan: Selbstverlag, 1984, 16 S.

/3/ Anonymus: Untersuchungsbericht zur Weihenstephaner Feuerungsprüfung am Stückholzkessel Hoval PuroLyt 25. Hrsg.: Landtechnischer Verein in Bayern e.V.. Freising: Selbstverlag 1998, 12 S. (Reihe „Landtechnik Feuerungsprüfungen", Heft 1)

/4/ Anonymus: MAK- und BAT-Werte-Liste 1996 – Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Hrsg.: Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1996, 188 S., Schriftenreihe „Mitteilung der Deutschen Forschungsgemeinschaft", Nr. 32

/5/ Boubel, R.W.; Fox, D.L.; Tuner, D.B.: Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, San Diego (USA), 1994

/6/ 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.

/7/ DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel – Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag

/8/ DIN 51 731: Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 1996.

/9/ DIN 4702, Teil 1 Entwurf (01/1993): Heizkessel - Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag

/10/ DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel - Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag

/11/ DIN 51 718 (01/1978): Feste Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag

/12/ 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

/13/ DIN 66 141 (02/1974): Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen - Grundlagen. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag

/14/ Dreiseidler, A.; Struschka, M.; Straub, D.; Baumbach, G.: Vergleichsmessungen mit Kaskadenimpaktoren - Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart, Bericht Nr. 45-2001, Stuttgart, Selbstverlag, 2001; 52 S.

/15/ Feldhaus, G. Hansel, H.D. (Bearb.): Bundes-Immissionsschutzgesetz. 11. Auflage. Heidelberg, C.F. Müller Verlag, 1997, 646 S.

/16/ Hartmann, H.; Böhm, T.: Bestimmung des Wassergehaltes und der physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Eigenschaften biogener Festbrennstoffe – Bestimmung Beeinflussung und Standardisierung. Internationale Tagung, 7.-8. Nov. 2000 Stuttgart, Tagungsband (in Druck)

/17/ Hartmann, H.; Launhardt, T.; Schmid, H.: Combination of Wood Fuel and Natural Gas in Domestic Heating Systems. In: "Biomass for Energy and Industry", Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition, 8-11 June 1998 in Würzburg, Published by C.A.R.M.E.N in Würzburg-Rimpar, Germany 1998, S. 1304-1307

/18/ 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

/19/ Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse. Hrsg.: Bundesamt für Energiewirtschaft. Bern/Schweiz: Selbstverlag, 1997, 54 S.

/20/ Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997

/21/ Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Particle Size Distribution of the Fly Ash from Biomass Combustion. In: Kopetz, H. u. a. (Hrsg.): Biomass for Energy and Industry; C.A.R.M.E.N., Würzburg-Rimpar, 1998, S. 1330-1333

/22/ Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Aerosole aus Biomassefeuerungen: Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung; 5. Holzenergie-Symposium 1998, Bundesamt für Energie, Bern, 1998, S. 45-74

/23/ Kamens, R.M.; Rives, G.D.; Perry, J.M.; Bell, D.A.; Paylor, R.F. Jr.; Goodman, R.G.; Claxton, L.D.: Mutagenic Changes in Dilute Wood Smoke as It Ages and Reacts with Ozone and Nitrogenic Dioxide: An Outdoor Chamber Study. Environmental Science & Technology, 1984, Vol. 18, No. 7, S. 523-530

/24/ Kicherer, A.: Biomasseverbrennung in Staubfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Schadstoffemissionen. Band 6. Hrsg: Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, 174 S., Schriftenreihe „VDI Fortschrittberichte“, Nr. 344

/25/ Krebs, R.: Staubbeladungsmessungen in strömenden Gasen. Hrsg.: Lurgi Umwelt- und Chemietechnik GmbH. Frankfurt am Main: Selbstverlag, 1978, 86 S.

/26/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe "Materialien", Nr. 156, 133 S.

/27/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V. Link, H.: Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Hrsg: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München: Selbstverlag 1998, 149 S. Schriftenreihe „StMLU-Materialien“ Nr. 142

/28/ Lewis, C.W.; Baumgardner, R.E.; Stevens, R.K.; Claxton, L.D.; Lewtas, J.: Contribution of Woodsmoke and Motor Vehicle Emissions to Ambient Aerosol Mutagenicity. Environmental Science & Technology, 1988, Vol. 22, No. 8, S. 968-971

/29/ Nussbaumer, T.: Direkte Thermische Umwandlung (Verbrennung) – Grundlagen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2001

/30/ Nussbaumer, T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz. Dissertation. Hrsg.: Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich. Zürich 1989: Juris Druck + Verlag, 193 S.; Schriftenreihe „Forschungsberichte“, Nr. 6

/31/ Oberhauser, K.; Kanak, M.; Hartmann, H.: Vergleich der Emissionen bei der Verbrennung von Getreideganzpflanzen an einer Praxisanlage in Abhängigkeit von der Brennstoffaufbereitung. Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, Freising, Selbstverlag, 1998, 24 S.

/32/ ÖNORM M7135: Preßlinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (ON) (Hrsg.), Wien, Österreich, Selbstverlag, 1998; 4 S.

/33/ Peschel, E.: Untersuchungen zur Partikelemission bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage. Diplomarbeit. Institut für Landtechnik, Technische Universität München, Freising, 1997, 58 S.

/34/ Schenk, S.: Aufbau einer Messeinrichtung zur fraktionierenden Staubmessung im Abgas von Biomassefeuerungen. Semesterarbeit. Institut für Landtechnik, Technische Universität München, Freising, 1996, 48 S.

/35/ Siegmann, K. und Siegmann, H.C.: Molekulare Vorstudien des Rußes und das Gesundheitsrisiko für den Menschen, Phys. Bl., 54 (1998) Nr. 2, S. 149-152

/36/ Ramdahl, T.; Alfheim, I.; Rustad, S.; Olsen, T.: Chemical and Biological Characterization of Emissions from Small Residential Stoves Burning Wood and Charcoal, Chemosphere, 1982, Vol. 11, 601-611

/37/ Siegmann, K. und Siegmann, H.C.: Molekulare Vorstudien des Rußes und das Gesundheitsrisiko für den Menschen, Phys. Bl., 54 (1998) Nr. 2, S. 149-152

/38/ VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung – Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/39/ VDI 2066 Blatt 5 Entwurf (11/1987): Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/40/ VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung - Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/41/ 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

/42/ VDI 3480, Blatt 1 (07/1984): Messen gasförmiger Emissionen - Messen von Chlorwasserstoff - Messen der Chlorwasserstoff-Konzentration von Abgas mit geringem Gehalt an chloridhaltigen Partikeln. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/43/ VDI 3481, Blatt 1 (08/1975): Messung gasförmiger Emissionen - Messen der Kohlenwasserstoff-Konzentration - Flammen-Ionisations-Detektor (FID). Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/44/ VDI 3499, Blatt 2 Entwurf (03/1993): Messen von Emissionen - Messen von polychlorierten Dibenzo-*p*-dioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF) - Filter/Kühler-Methode. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

/45/ Vetter, A. et al.: Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Abschlussbericht für Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 1995, 54 S.

/46/ Weber, R.; Moxter, W.; Pilz, M.; Pospischil, H.; Roleder, G.: Untersuchungen zum Einfluss der biogenen Brennstoffe und -qualität sowie der Fahrweise der Anlage auf die gas- und partikelförmigen Emissionen des Strohheizkraftwerkes Schkölen zur Bewertung der Umweltverträglichkeit. Abschlussbericht für Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 1995, 54 S.

7 Anhang

7.1 Versuchsergebnisse

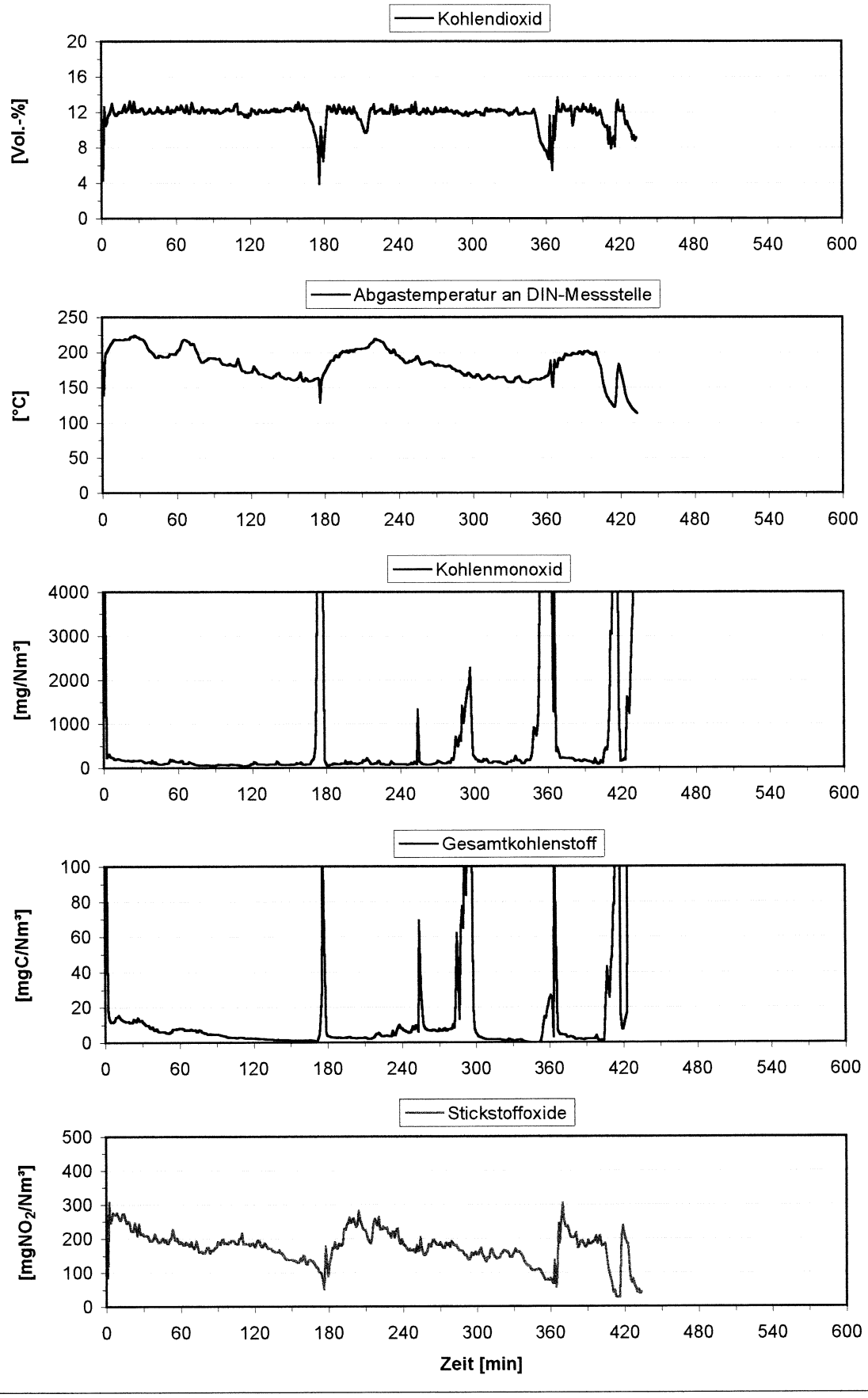
7.1.1 Stückholzkessel "modern"

Tabelle 13 Ergebnisse der Feuerungsversuche am Stückholzkessel „modern“ mit Fichtenscheitholz bei Nennwärmeleistung (NWL), kleinster Wärmeleistung (MWL) und mit Buchenholz bei kleinster Wärmeleistung (KWL)

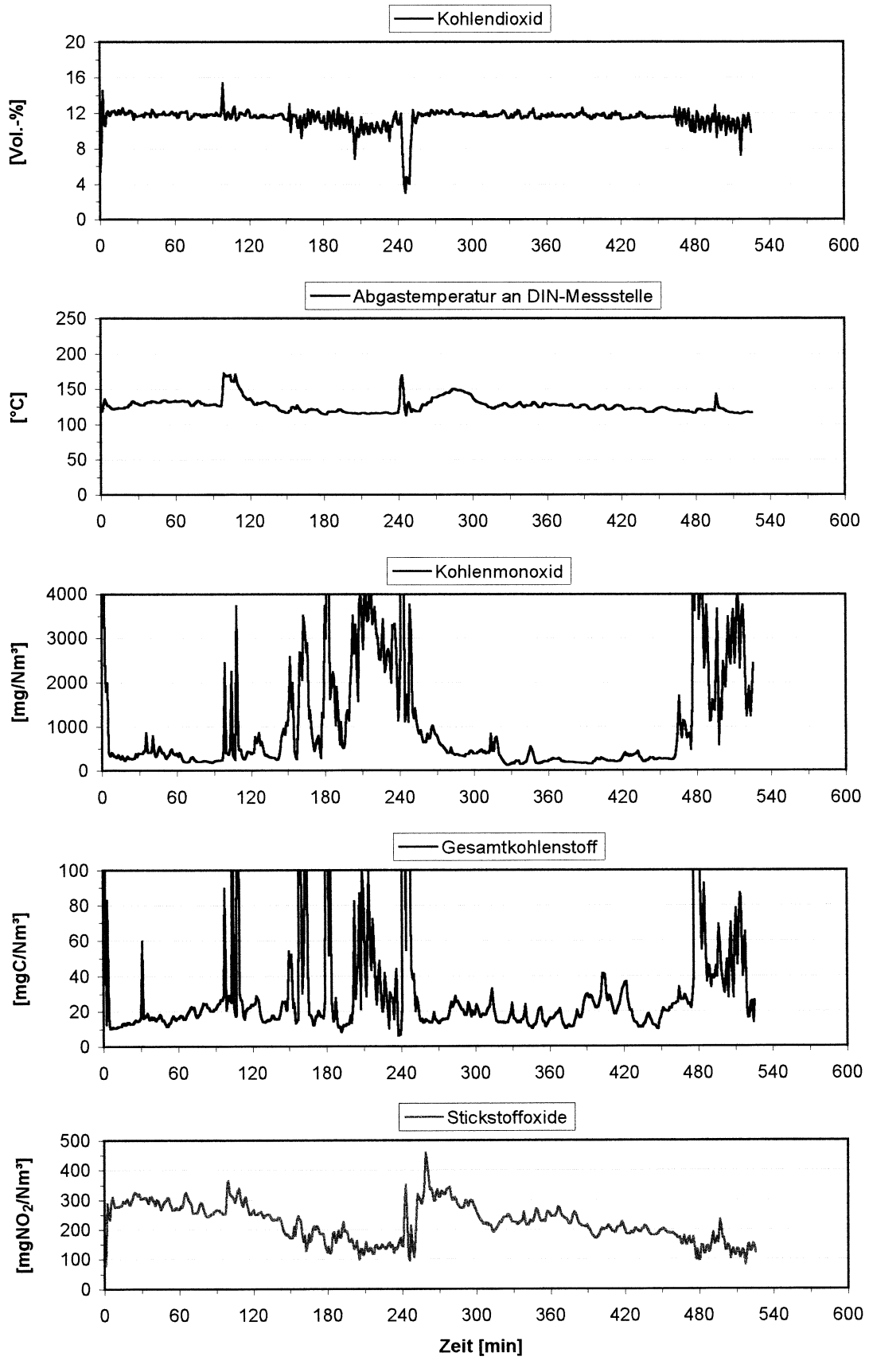
Scheitholzkessel (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Fichtenscheitholz		
			NWL	KWL (Buche)	KWL
Brennstoffmenge		kg	54,5	40,0	8,2
Anzahl der Wiederholungen		n	2	2	2
Gesamtdauer		min	404	461	438
mittlere Probenahmedauer		min	202	231	219
Heizwert des Brennstoffs		kJ/kg	15735	15291	15786
Wassergehalt		%	14,5	15,0	14,3
CO_2	Abgas-parameter	%	11,6	11,7	11,4
O_2		%	8,7	8,6	9,0
CO		ppm	399	614	1415
CO (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	324	494	1185
VOC (bei 13 % O_2 und trockenes Abgas)		mgC/Nm³	9,1	19,5	221
Staub (Filterkopfgerät) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	35,5	14,0	20,5
NO_x (ang. als NO_2) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	128	152	107
Abgastemperatur		°C	179	127	123
Kaminzug		Pa	-21	-17	-11
Feuerungswärmeleistung	Leistung	kW	35,6	22,4	18,6
Wärmeleistung		kW	28,6	15,9	15,6
Wirkungsgrad, feuerungstechnisch		%	89,4	93,2	92,6
Kesselwirkungsgrad[1)]		%	80,4	71,7	87,0
Auslastung		%	95,3	53,1	52,0

[1)] Bestimmungszeitraum nicht deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad

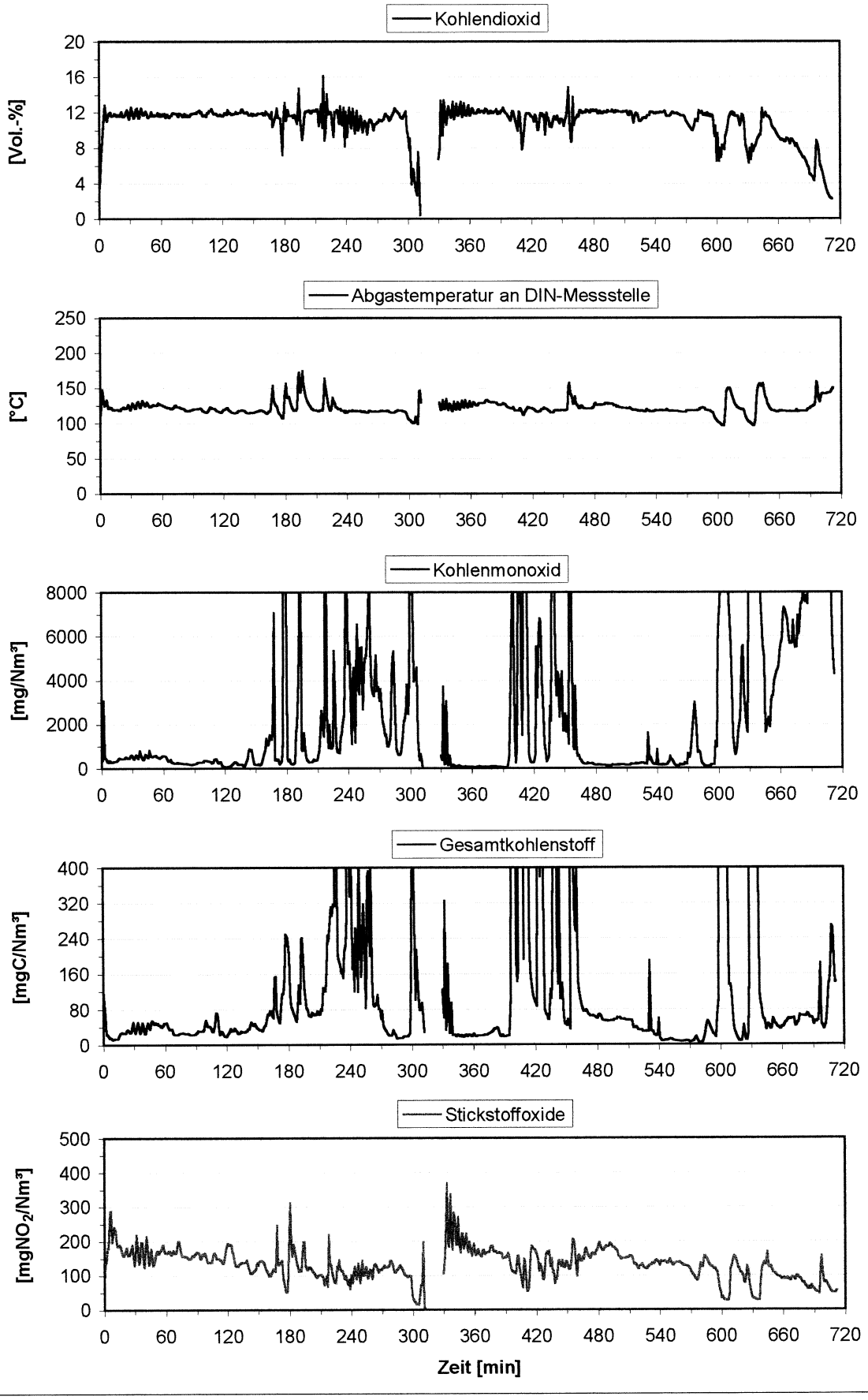
Zeitverläufe – Stückholzkessel – NWL – (V13), V14



Zeitverläufe – Stückholzkessel – KWL (Buche) – V18, V19



Zeitverläufe – Stückholzkessel – KWL – (V15), V1617



7.1.2 Stückholzkessel "alte Technik"

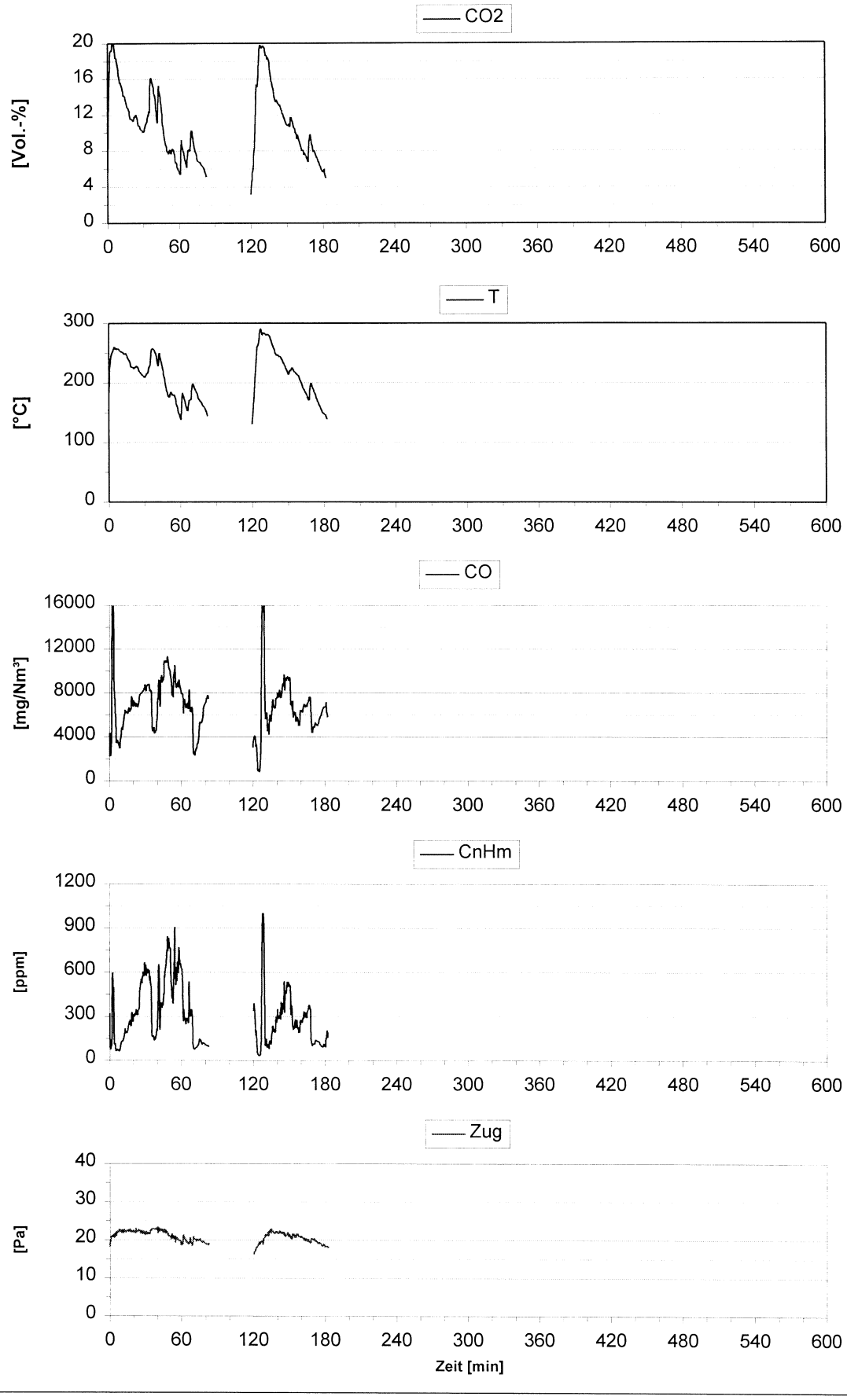
Tabelle 14 Ergebnisse der Feuerungsversuche am Stückholzkessel „alte Technik“ mit Fichtenscheitholz bei Nennwärmeleistung (NWL), mittlerer Wärmeleistung (MWL) und kleinster Wärmeleistung (KWL)

Scheitholzkessel, alt (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Fichtenscheitholz		
			NWL	MWL	KWL
Brennstoffmenge		kg	19,0	19,0	21,0
Anzahl der Wiederholungen		n	2	2	3
Gesamtdauer		min	130	162	183
mittlere Probenahmedauer		min	65	81	61
Heizwert des Brennstoffs		kJ/kg	15064	15064	15064
Wassergehalt		%	15,0	15,0	15,0
CO_2	Abgas-parameter	%	11,5	9,9	8,4
$O_{2,\ berechnet\ mit\ 20,3\ C02max}$		%	8,8	10,4	11,9
CO		ppm	5779	5729	4137
CO (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	4724	5400	4537
VOC (bei 13 % O_2 und trockenes Abgas)		mgC/Nm³	345	530	386
Staub (Filterkopfgerät)[3] (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	144	245	189
Temperatur an Staubmessstelle im Verdünnungstunnel[4]		°C	53	51	50
NO_x (ang. als NO_2) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	n.b.	n.b.	n.b.
Abgastemperatur		°C	217	201	187
Kaminzug		Pa	-21	-20	-19
Feuerungswärmeleistung	Leistung	kW	37,1	29,5	29,0
Wärmeleistung		kW	31,2	24,7	24,1
Wirkungsgrad, feuerungstechnisch		%	84,2	83,2	82,8
Kesselwirkungsgrad[1]		%	n.b.	n.b.	n.b.
Auslastung		%	94,5	75,0	73,0

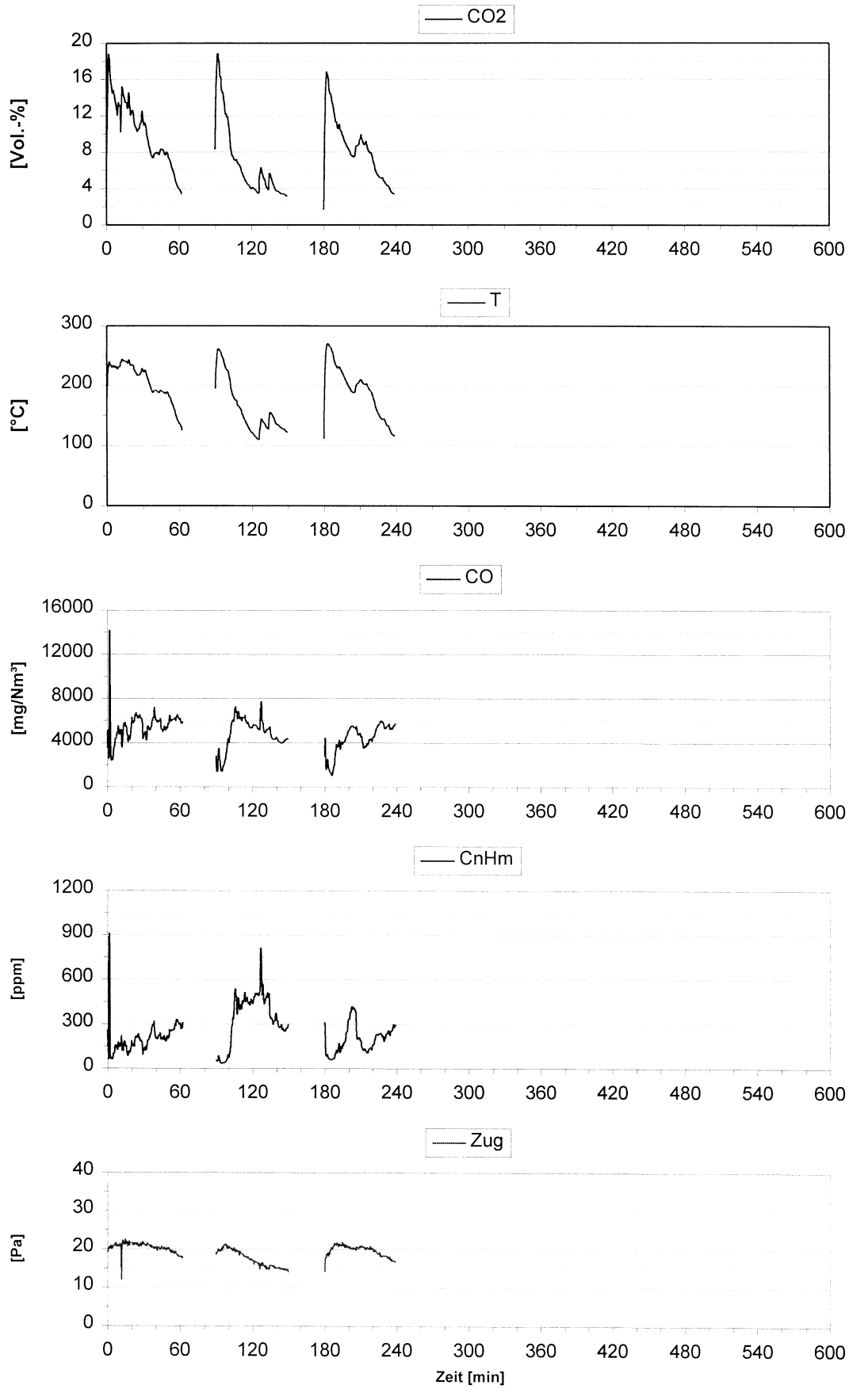
[1] Bestimmungszeitraum deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad
[2] n.b. nicht bestimmt, k.A. keine Angabe
[3] Staubmessung im verdünnten Abgas (Verdünnungstunnel – siehe hierzu auch Teil I: Einzelfeuerstätten)
[4] Temperaturen an Staubmessstelle sind in den folgenden Zeitverläufen nicht dargestellt, da weitgehend konstant während den verschiedenen Probenahmezeiten

Die Einzelversuche wurden in den Zeitverläufen nacheinander dargestellt.

Zeitverläufe – Stückholzkessel „alte Technik“ – NWL – V37, V40



Zeitverläufe – Stückholzkessel „alte Technik“ – KWL – V41, V42, V43



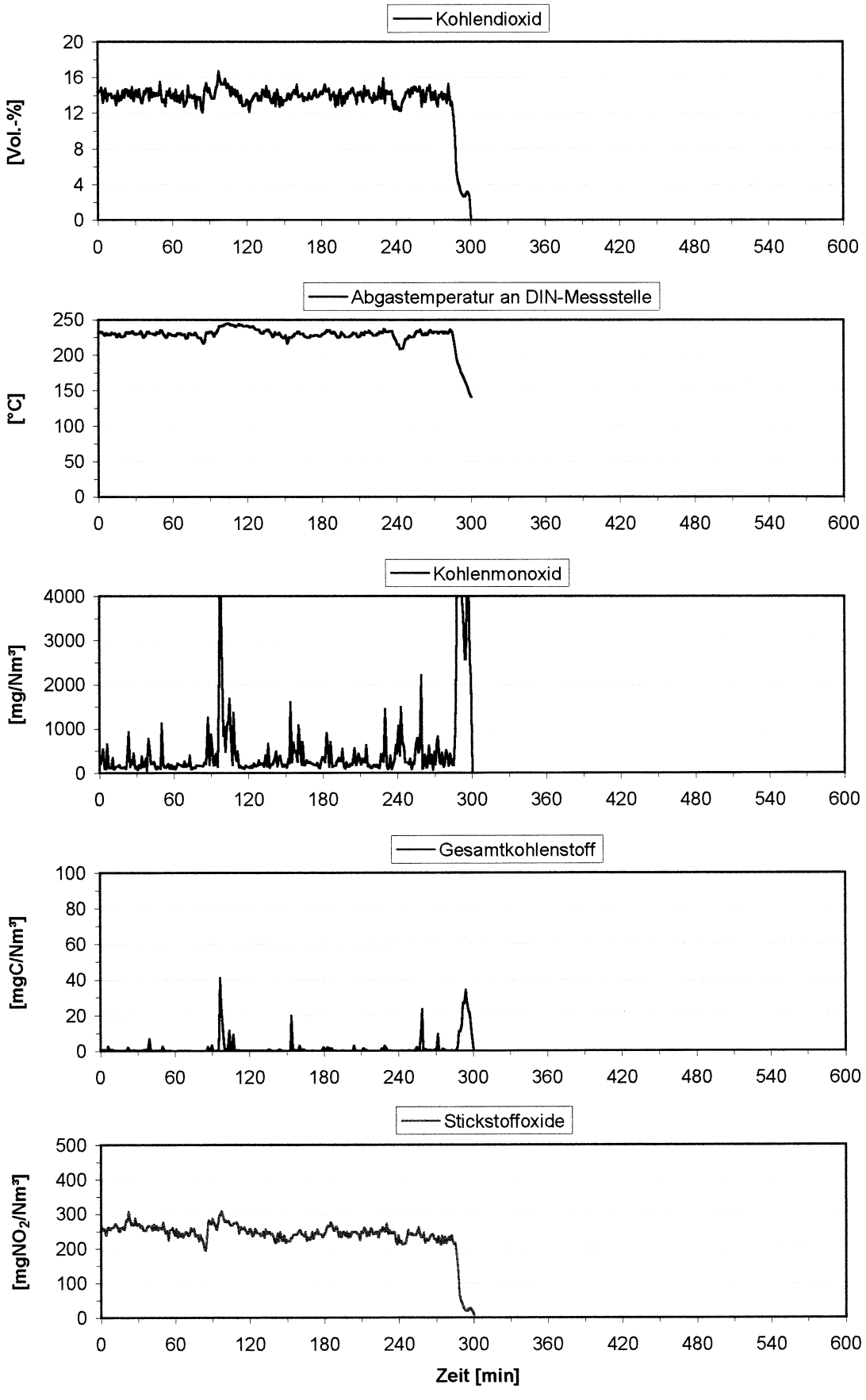
7.1.3 Hackgutkessel, w=15%

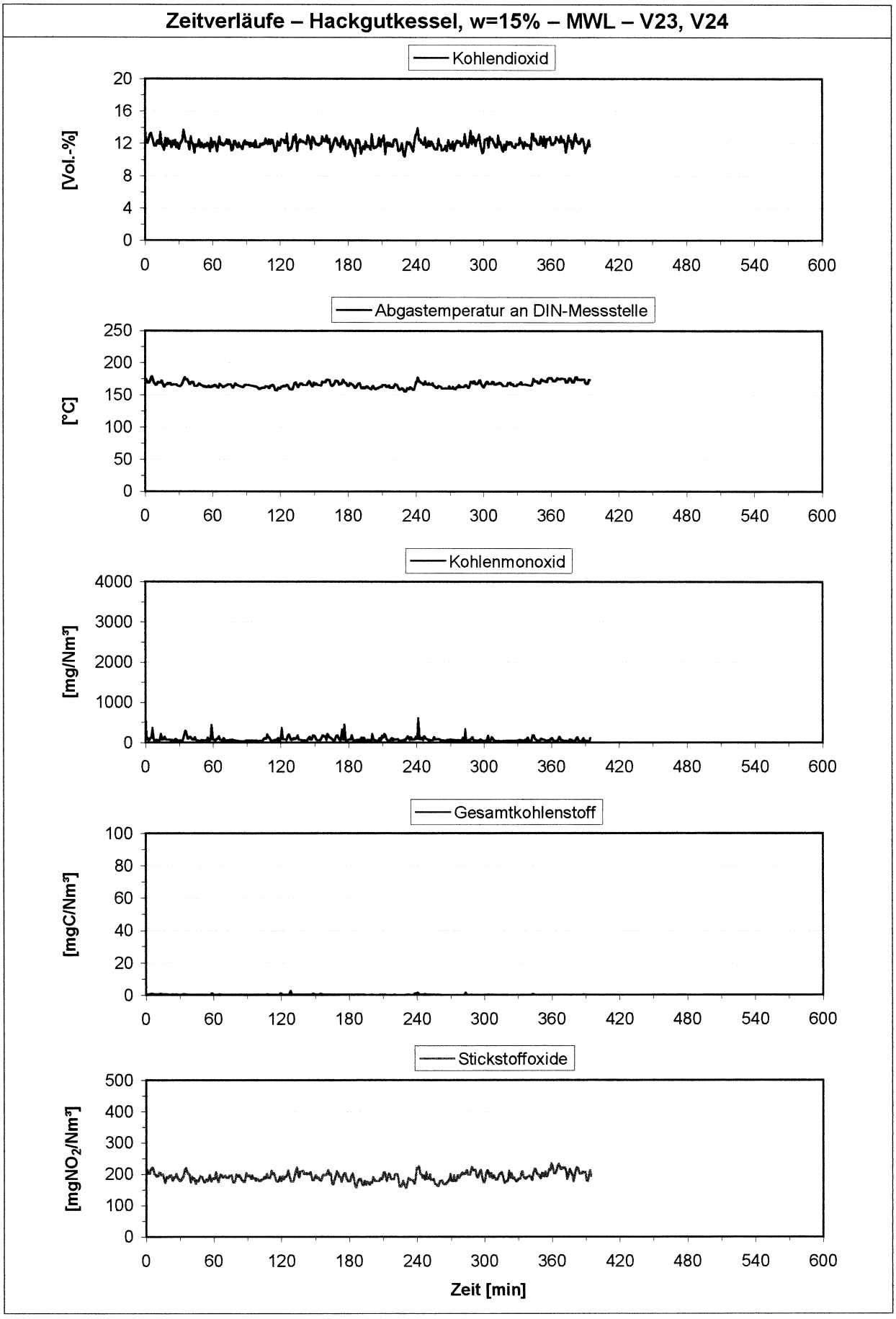
Tabelle 15 Ergebnisse der Feuerungsversuche am Hackgutkessel mit trockenem Fichtenhackgut bei Nennwärmeleistung (NWL), mittlerer Wärmeleistung (MWL) und kleinster Wärmeleistung (KWL)

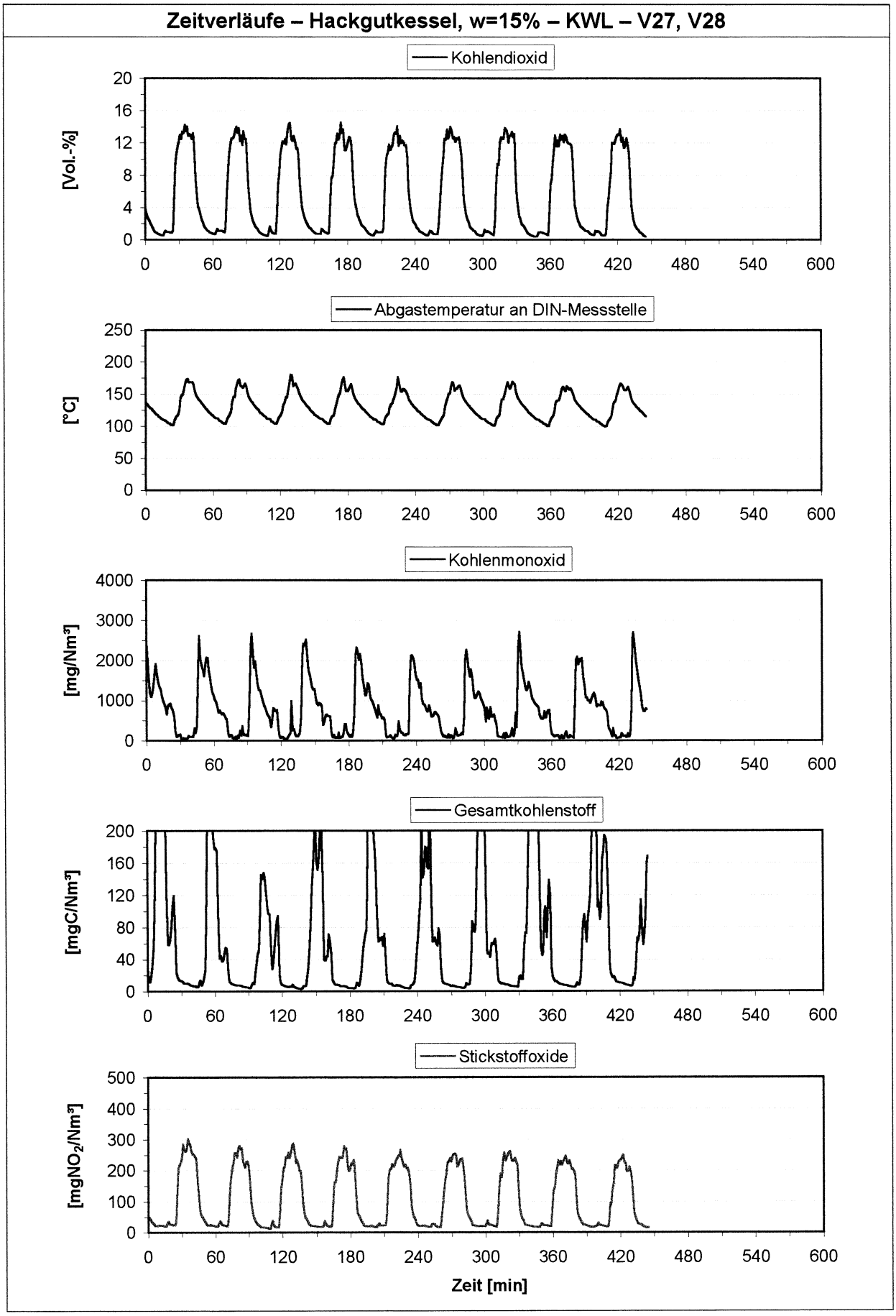
Hackgutkesselkessel (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Fichtenhackgut, trocken		
			NWL	MWL	KWL
Brennstoffmenge		kg	44,4	46,9	25,0
Anzahl der Wiederholungen		n	2	2	2
Gesamtdauer		min	182	330	371
mittlere Probenahmedauer		min	91	165	186
Heizwert des Brennstoffs		kJ/kg	15801	15737	15829
Wassergehalt		%	14,2	14,5	14,1
CO_2	Abgas-parameter	%	13,4	12,1	5,5
O_2		%	6,9	8,4	15,2
CO		ppm	465	65,5	634
CO (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	334	52,0	1092
VOC (bei 13 % O_2 und trockenes Abgas)		mgC/Nm³	2,4	<1,0	93,5
Staub (Filterkopfgerät) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	25,5	22,0	28,5
NO_x (ang. als NO_2) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	126	123	142
Abgastemperatur		°C	210	164	128
Kaminzug		Pa	-28	-29	-28
Feuerungswärmeleistung	Leistung	kW	59,9	37,2	17,8
Wärmeleistung		kW	52,3	32,6	14,4
Wirkungsgrad, feuerungstechnisch		%	89,1	90,6	85,3
Kesselwirkungsgrad[1)]		%	87,3	87,8	81,8
Auslastung		%	105	65,3	28,8

[1)] Bestimmungszeitraum nicht deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad

Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=15% – NWL – V25, V26




Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=15% – MWL – V23, V24
Kohlendioxid
[Vol.-%]
20
16
12
8
4
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Abgastemperatur an DIN-Messstelle
[°C]
250
200
150
100
50
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Kohlenmonoxid
[mg/Nm³]
4000
3000
2000
1000
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Gesamtkohlenstoff
[mgC/Nm³]
100
80
60
40
20
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Stickstoffoxide
[mgNO2/Nm³]
500
400
300
200
100
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Zeit [min]


Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=15% – KWL – V27, V28
Kohlendioxid
[Vol.-%]
20
16
12
8
4
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Abgastemperatur an DIN-Messstelle
[°C]
250
200
150
100
50
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Kohlenmonoxid
[mg/Nm³]
4000
3000
2000
1000
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Gesamtkohlenstoff
[mgC/Nm³]
200
160
120
80
40
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Stickstoffoxide
[mgNO2/Nm³]
500
400
300
200
100
0
0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600
Zeit [min]

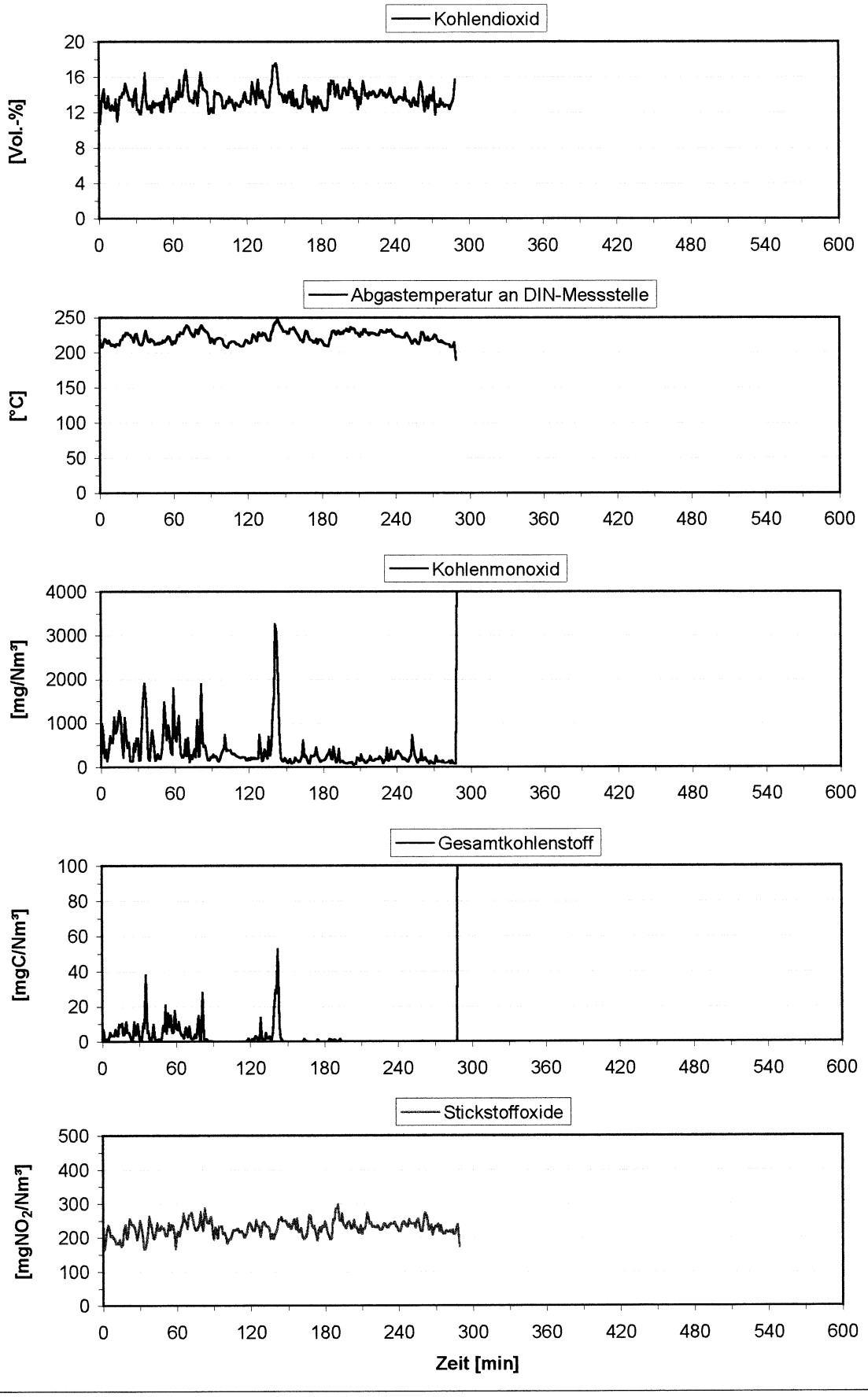
7.1.4 Hackgutkessel, w=35%

Tabelle 16 Ergebnisse der Feuerungsversuche am Hackgutkessel mit feuchtem Fichtenhackgut bei Nennwärmeleistung (NWL), mittlerer Wärmeleistung (MWL) und kleinster Wärmeleistung (KWL)

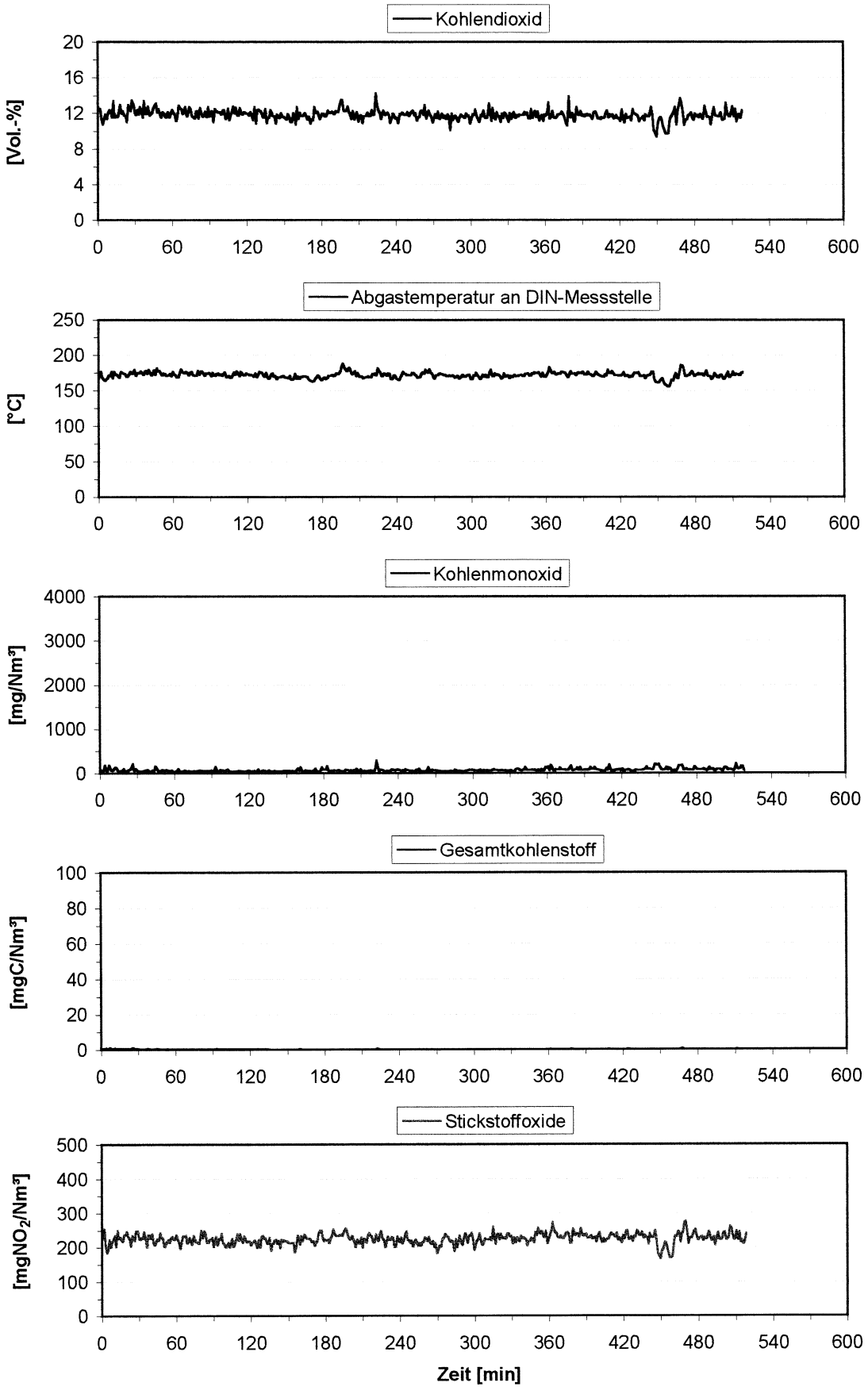
Hackgutkesselkessel (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Fichtenhackgut, feucht		
			NWL	MWL	KWL
Brennstoffmenge		kg	73,8	84,5	11,5
Anzahl der Wiederholungen		n	2	2	2
Gesamtdauer		min	240	450	127
mittlere Probenahmedauer		min	120	225	64
Heizwert des Brennstoffs		kJ/kg	11038	11053	11889
Wassergehalt		%	36,6	36,5	32,6
CO_2	Abgas-parameter	%	13,6	11,9	6,0
O_2		%	6,6	8,5	14,6
CO		ppm	280	59,5	1531
CO (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	196	48,0	2374
VOC (bei 13 % O_2 und trockenes Abgas)		mgC/Nm³	1,7	<1,0	115
Staub (Filterkopfgerät) (bei 13%O_2)		mg/Nm³	17,0	12,0	30,0
NO_x (ang. als NO_2) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	127	145	118
Abgastemperatur		°C	219	170	123
Kaminzug		Pa	-30	-27	-28
Feuerungswärmeleistung	Leistung	kW	56,6	34,5	17,7
Wärmeleistung		kW	47,8	30,6	13,1
Wirkungsgrad, feuerungstechnisch		%	87,0	89,1	85,8
Kesselwirkungsgrad[1)]		%	84,6	88,9	74,2
Auslastung		%	95,6	61,3	26,1

[1)] Bestimmungszeitraum nicht deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad

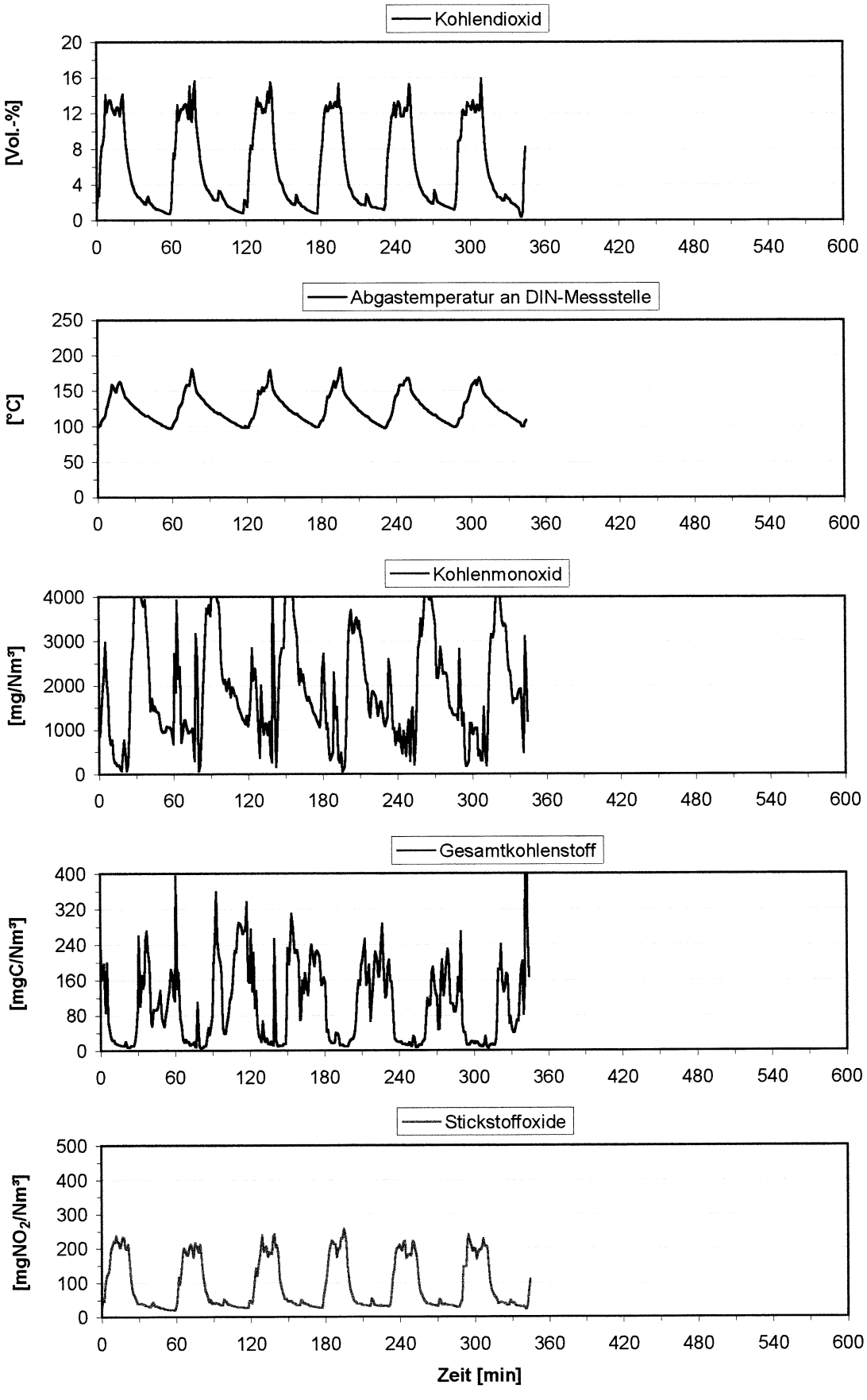
Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=35% – NWL – V34, V35



Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=35% – MWL – V29, V30



Zeitverläufe – Hackgutkessel, w=35% – KWL – V31, V33



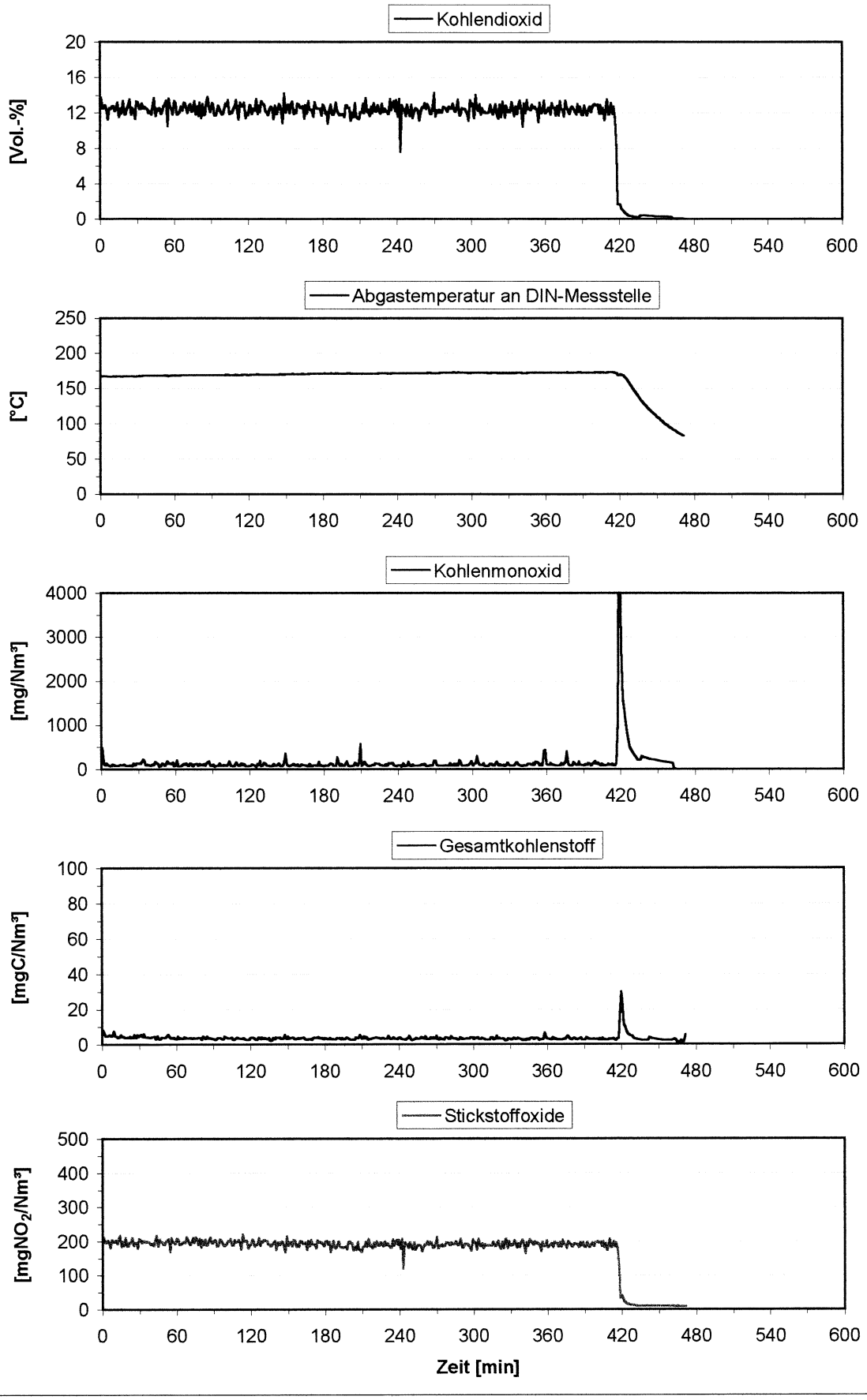
7.1.5 Pelletkessel

Tabelle 17: Ergebnisse der Feuerungsversuche am Pelletkessel bei Nennwärmeleistung (NWL), mittlerer Wärmeleistung (MWL) und kleinster Wärmeleistung (KWL)

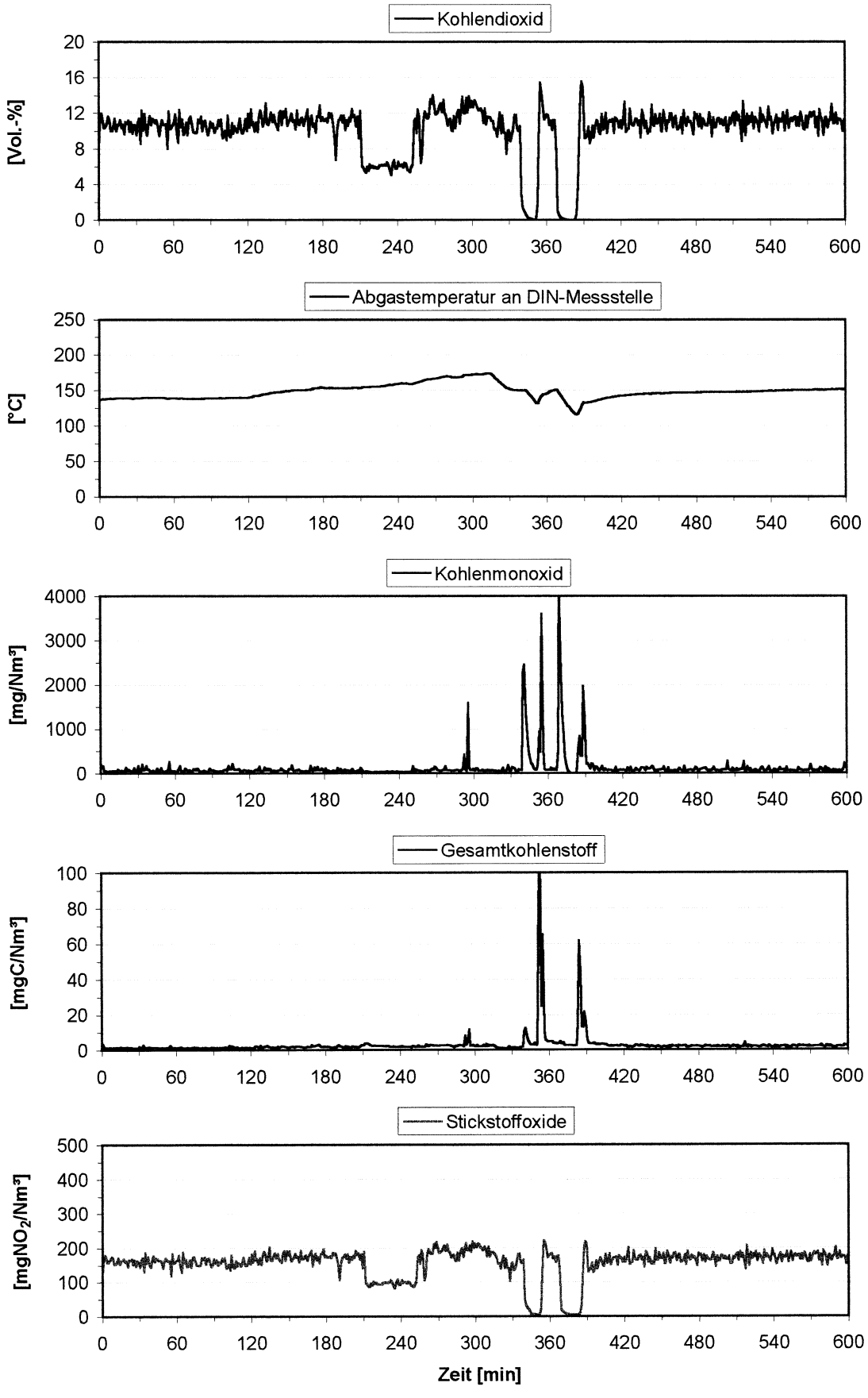
Pelletkessel (Mittelwerte der Versuchsreihe)			Pellets		
			NWL	MWL	KWL
Brennstoffmenge		kg	22,0	14,5	9,0
Anzahl der Wiederholungen		n	2	2	2
Gesamtdauer		min	360	357	394
mittlere Probenahmedauer		min	180	179	197
Heizwert des Brennstoffs		kJ/kg	17376	17332	17333
Wassergehalt		%	7,9	8,2	8,2
CO_2	Abgas-parameter	%	12,5	10,8	9,5
O_2		%	7,8	9,5	11,0
CO		ppm	85,5	74,5	96,5
CO (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	65,0	50,5	101
VOC (bei 13 % O_2 und trockenes Abgas)		mgC/Nm³	2,2	5,4	11,0
Staub (Filterkopfgerät) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	20,0	15,0	15,0
NO_x (ang. als NO_2) (bei 13 % O_2)		mg/Nm³	117	118	107
Abgastemperatur		°C	168	137	106
Kaminzug		Pa	-12	-11	-10
Feuerungswärmeleistung	Leistung	kW	17,8	11,8	6,6
Wärmeleistung		kW	15,1	9,9	5,3
Wirkungsgrad, feuerungstechnisch		%	91,5	92,6	93,8
Kesselwirkungsgrad[1)]		%	85,2	84,6	81,5
Auslastung		%	101	66,2	35,7

[1)] Bestimmungszeitraum nicht deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad

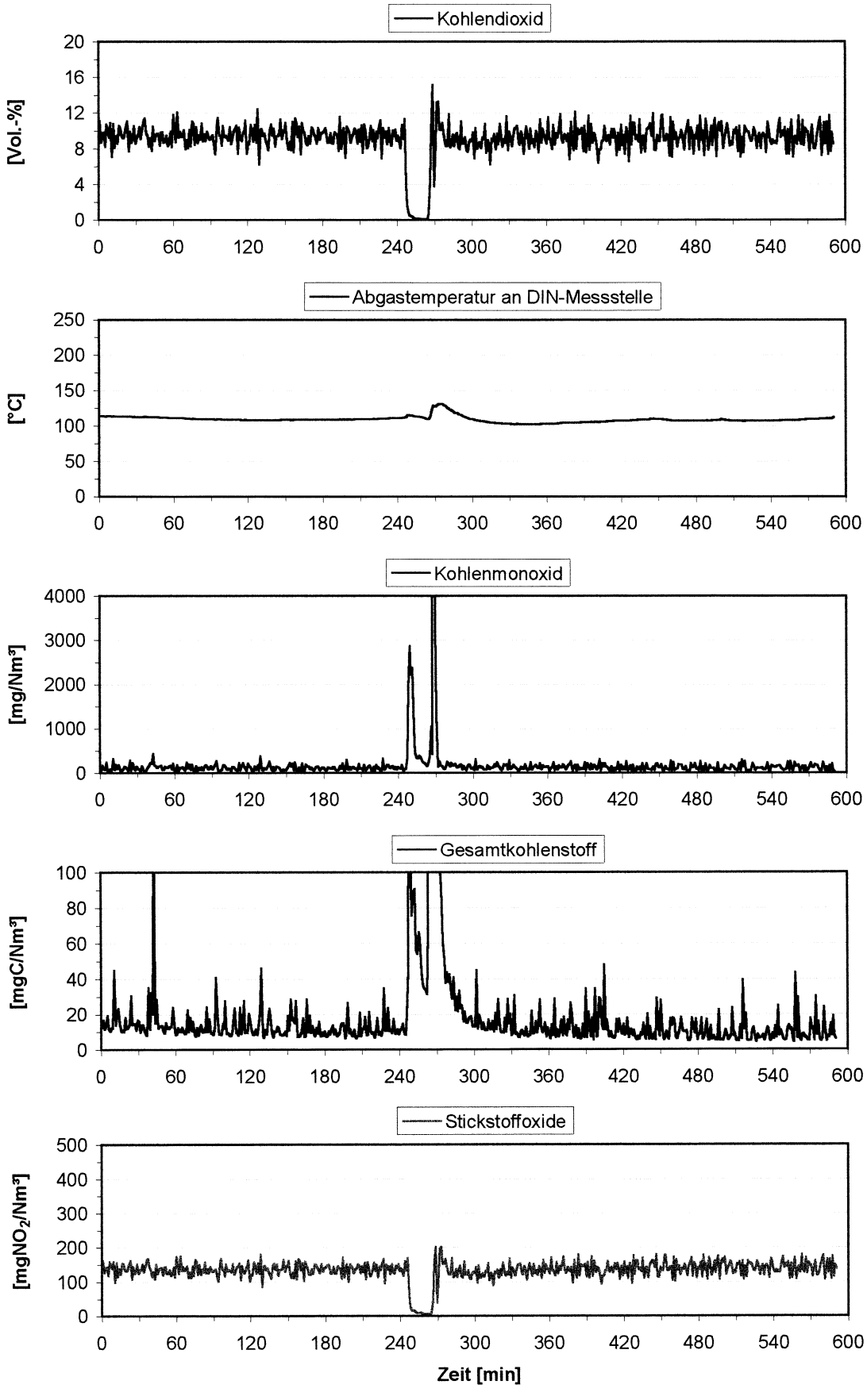
Zeitverläufe – Pelletkessel – NWL – V03, V04



Zeitverläufe – Pelletkessel – MWL – V05, (V10)



Zeitverläufe – Pelletkessel – KWL – (V02), V07



7.2 NO_x-Emissionen und Wirkungsgrade

In der folgenden Tabelle sind die Betriebsparameter der Feuerungsanlagen zu den Versuchsvarianten aufgeführt:

Tabelle 18 Stickstoffdioxid(NO_x)-Emission und Wirkungsgrade aller untersuchen Varianten und Einflussgrößen. NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinster Wärmeleistung

Feuerungstyp	Brennstoff	NO_x mg/Nm³ (bei 13% O_2)			feuerungstechnischer Wirkungsgrad %			Kessel-wirkungsgrad[2] %		
		NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL
Stückholzkessel, "modern"	Fichten-scheite	128	---	107	89,4	---	92,6	80,4	---	87,0
	Buchen-scheite[1]	---	---	152	---	---	93,2	---	---	71,7
Stückholzkessel, "alte Technik"	Fichten-scheite	---	---	---	84,2	---	82,8	---	---	---
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	126	123	142	89,1	90,6	85,3	87,3	87,8	81,8
	Hackgut w = 35 %	127	145	118	87,0	89,1	85,8	84,6	88,9	74,2
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holz-pellets	117	118	107	91,5	92,6	93,8	85,2	84,6	81,5

[1] Zusatzversuch aufgrund von Brückenbildung bei Fichtenscheitholz
[2] Bestimmungszeitraum nicht deckungsgleich mit Zeitraum bei feuerungstechnischem Wirkungsgrad

7.3 Abgasemissionen

a) Ergebnisse in mg/MJ:

Bezeichnung	Leistungs-stufe	Impaktor	Kohlen-monoxid [mg/MJ]	VOC [mg/MJ]	Stickstoff-oxid [mg/MJ]	Ge-samtstaub [mg/MJ]
Stückholzkessel "modern"	NWL	V11	214	7,5	93,6	17,4
		V14	203	4,6	71,1	28,2
	Mittelwert		209	6,0	82,4	22,8
	KWL	V12	767	185	91,9	11,3
		V1617	1300	182	88,9	26,7
	Mittelwert		1034	183	90,4	19,0
Stückholzkessel "modern" (Buche)	KWL	V18	308	11,5	99,3	9,7
		V19	340	13,8	99,1	8,5
	Mittelwert		324	12,6	99,2	9,1
Stückholzkessel "alte Technik"	NWL	V37	3240	271	n.b.	115
		V40	3069	189	n.b.	76,6
	Mittelwert		3155	230	n.b.	95,7
	KWL	V41	2799	166	n.b.	78,2
		V42	3629	414	n.b.	148
		V43	2662	193	n.b.	79,7
	Mittelwert		3030	258	n.b.	102
Hackgutkessel w=15%	NWL	V25	139	<1,0	92,0	23,1
		V26	129	<1,0	89,3	18,1
	Mittelwert		134	<1,0	90,7	20,6
	MWL	V23	42,7	<1,0	88,1	15,8
		V24	31,4	<1,0	86,7	15,3
	Mittelwert		37,0	<1,0	87,4	15,6
	KWL	V27	542	39,5	77,2	11,9
		V28	658	63,7	78,0	19,3
	Mittelwert		600	51,6	77,6	15,6
Hackgutkessel w=35%	NWL	V34	226	1,8	97,5	12,8
		V35	79,8	<1,0	101	14,4
	Mittelwert		153	1,4	99,1	13,6
	MWL	V29	29,8	<1,0	104	7,6
		V30	39,7	<1,0	107	10,0
	Mittelwert		34,7	<1,0	105	8,8
	KWL	V31	1157	61,5	63,1	11,4
		V33	1602	70,2	72,4	24,3
	Mittelwert		1380	65,8	67,8	17,8
Pelletkessel	NWL	V03	54,9	2,0	102	16,8
		V04	57,4	1,8	100	17,4
	Mittelwert		56,2	1,9	101	17,1
	MWL	V05	48,6	<1,0	106	14,4
		V10	43,0	8,6	108	12,5
	Mittelwert		45,8	4,8	107	13,4
	KWL	V02	62,0	n.b.	61,9	9,1
		V07	103	12,0	118	16,5
	Mittelwert		82,4	12,0	90,2	12,8

n.b. nicht bestimmt

b) Ergebnisse in mg/Nm³:

Bezeichnung	Leistungs-stufe	Impaktor	Kohlen-monoxid [mg/Nm³]	VOC[1)] [mg/Nm³]	Stickstoff-oxid [mg/Nm³]	Ge-samtstaub [mg/Nm³]
Stückholzkessel "modern"	NWL	V11	327	11,0	143	28,6
		V14	321	7,2	112	40,4
	Mittelwert		324	9,1	128	34,5
	KWL	V12	985	238	118	14,6
		V1617	1386	203	96,5	26,3
	Mittelwert		1185	221	107	20,5
Stückholzkessel "modern" (Buche)	KWL	V18	500	19,0	161	14,0
		V19	487	20,0	142	12,1
	Mittelwert		494	19,5	152	13,1
Stückholzkessel "alte Technik"	NWL	V37	4852	406	n.b.	172
		V40	4596	283	n.b.	115
	Mittelwert		4724	345	n.b.	143
	KWL	V41	4191	248	n.b.	117
		V42	5435	620	n.b.	222
		V43	3986	289	n.b.	119
	Mittelwert		4537	386	n.b.	153
Hackgutkessel w=15%	NWL	V25	211	<1,0	140	36,4
		V26	190	<1,0	131	27,5
	Mittelwert		201	<1,0	136	32,0
	MWL	V23	59,0	<1,0	121	21,9
		V24	45,0	<1,0	124	21,9
	Mittelwert		52,0	<1,0	123	21,9
	KWL	V27	1006	73,0	143	24,8
		V28	1177	114	140	43,1
	Mittelwert		1092	93,5	142	34,0
Hackgutkessel w=35%	NWL	V34	289	2,3	125	17,7
		V35	102	<1,0	129	19,0
	Mittelwert		196	1,7	127	18,4
	MWL	V29	41,0	<1,0	141	11,3
		V30	55,0	<1,0	148	14,5
	Mittelwert		48,0	<1,0	145	12,9
	KWL	V31	2157	115	118	25,4
		V33	2591	114	117	44,1
	Mittelwert		2374	115	118	34,8
Pelletkessel	NWL	V03	64,0	2,3	119	19,0
		V04	66,0	2,0	115	19,3
	Mittelwert		65,0	2,2	117	19,2
	MWL	V05	53,0	1,1	115	15,3
		V10	48,0	9,7	121	14,0
	Mittelwert		50,5	5,4	118	14,7
	KWL	V02	106	n.b.	105	14,6
		V07	95,0	11,0	109	15,2
	Mittelwert		101	11,0	107	14,9

[1)] berechnet für trockenes Abgas
n.b. nicht bestimmt

7.4 Trenndurchmesser und relative Massenanteile – Impaktor

Bezeichnung	Leistungsstufe	Versuchsnummer	Grenzpartikeldurchmesser d_{ae} 50 in µm für die Trennstufen									Anteilige Partikelmasse in % für die Trennstufen								
			EF	8	7	6	5	4	3	2	1	EF	8	7	6	5	4	3	2	1
Stückholzkessel "modern"	NWL	V11	<0,47	0,47	0,65	1,08	2,19	3,44	5,07	7,50	12,04	29,3	2,1	4,2	9,0	10,4	9,9	7,8	11,9	15,4
		V14	<0,50	0,50	0,68	1,13	2,30	3,60	5,30	7,84	12,59	29,3	2,1	4,1	8,3	10,1	10,9	8,6	10,7	16,0
	Mittelwert		<0,49	0,49	0,66	1,10	2,24	3,52	5,18	7,67	12,31	29,3	2,1	4,2	8,7	10,3	10,4	8,2	11,3	15,7
	KWL	V12	<0,52	0,52	0,70	1,16	2,33	3,65	5,37	7,93	12,72	61,8	10,1	6,4	4,4	4,2	3,2	3,6	3,0	3,2
		V1617	<0,58	0,58	0,78	1,28	2,44	3,80	5,59	8,25	13,23	50,4	9,2	4,4	5,9	6,4	6,0	7,6	5,7	4,5
	Mittelwert		<0,55	0,55	0,74	1,22	2,39	3,72	5,48	8,09	12,97	56,1	9,6	5,4	5,1	5,3	4,6	5,6	4,4	3,8
Stückholzkessel "modern" (Buche)	KWL	V18	<0,53	0,53	0,72	1,19	2,40	3,75	5,51	8,14	13,06	62,0	3,4	3,1	4,8	5,2	4,0	3,8	4,8	8,9
		V19	<0,53	0,53	0,72	1,19	2,39	3,74	5,49	8,11	13,01	80,6	4,1	2,8	2,3	1,8	1,3	1,2	1,2	4,7
	Mittelwert		<0,53	0,53	0,72	1,19	2,39	3,74	5,50	8,13	13,03	71,3	3,8	3,0	3,5	3,5	2,7	2,5	3,0	6,8
Stückholzkessel "alte Technik" [1]	NWL	V37	<0,54	0,54	0,72	1,18	2,37	3,69	5,43	8,01	12,84	62,6	17,7	12,6	2,6	1,3	0,8	1,8	0,1	0,4
		V40	<0,52	0,52	0,70	1,15	2,31	3,60	5,29	7,82	12,53	43,1	16,7	15,0	6,8	3,5	2,9	4,4	3,3	4,3
	Mittelwert		<0,53	0,53	0,71	1,16	2,34	3,65	5,36	7,91	12,69	52,9	17,2	13,8	4,7	2,4	1,8	3,1	1,7	2,4
	KWL	V41	<0,52	0,52	0,70	1,14	2,30	3,59	5,27	7,78	12,47	59,6	11,9	16,8	2,3	1,9	1,0	0,9	1,9	3,7
		V42	<0,56	0,56	0,75	1,22	2,45	3,82	5,61	8,29	13,28	58,7	18,7	7,1	3,7	2,9	2,5	2,9	2,6	0,9
		V43	<0,56	0,56	0,75	1,23	2,47	3,85	5,65	8,34	13,36	66,6	14,3	6,5	2,5	2,7	1,9	2,8	1,5	1,3
	Mittelwert		<0,55	0,55	0,73	1,20	2,40	3,75	5,51	8,13	13,04	61,6	15,0	10,1	2,8	2,5	1,8	2,2	2,0	2,0
Hackgutkessel w=15%	NWL	V25	<0,48	0,48	0,67	1,11	2,28	3,57	5,27	7,80	12,53	75,4	3,6	2,6	1,4	1,8	1,5	1,8	3,8	8,0
		V26	<0,49	0,49	0,67	1,12	2,28	3,58	5,27	7,81	12,54	77,8	3,6	2,5	1,6	2,1	1,6	1,2	1,7	7,9
	Mittelwert		<0,49	0,49	0,67	1,12	2,28	3,58	5,27	7,80	12,53	76,6	3,6	2,6	1,5	2,0	1,5	1,5	2,8	7,9
	MWL	V23	<0,50	0,50	0,68	1,13	2,29	3,59	5,29	7,82	12,55	85,2	4,2	2,9	2,0	2,4	1,5	0,9	0,4	0,6
		V24	<0,51	0,51	0,70	1,16	2,35	3,68	5,41	8,00	12,83	87,6	4,8	2,9	0,9	1,6	1,1	0,8	0,0	0,4
	Mittelwert		<0,51	0,51	0,69	1,15	2,32	3,63	5,35	7,91	12,69	86,4	4,5	2,9	1,5	2,0	1,3	0,8	0,2	0,5
	KWL	V27	<0,50	0,50	0,68	1,12	2,26	3,55	5,22	7,71	12,38	75,4	5,0	3,7	2,9	2,9	2,1	1,9	2,2	4,0
		V28	<0,54	0,54	0,73	1,20	2,42	3,78	5,56	8,22	13,19	78,1	5,5	3,7	2,5	2,4	2,1	2,2	1,7	1,8

Bezeichnung	Leistungs-stufe	Versuchs-nummer	Grenzpartikeldurchmesser d_{ae} 50 in µm für die Trennstufen									Anteilige Partikelmasse in % für die Trennstufen								
			EF	8	7	6	5	4	3	2	1	EF	8	7	6	5	4	3	2	1
	Mittelwert		<0,52	0,52	0,70	1,16	2,34	3,66	5,39	7,97	12,78	76,7	5,3	3,7	2,7	2,7	2,1	2,0	1,9	2,9
Hackgutkessel w=35%	NWL	V34	<0,46	0,46	0,63	1,06	2,16	3,39	5,00	7,41	11,90	60,3	2,8	2,0	1,5	2,1	2,2	4,1	9,1	15,9
		V35	<0,46	0,46	0,63	1,05	2,15	3,38	4,99	7,39	11,87	60,3	2,6	1,4	1,0	2,0	1,9	3,0	7,7	20,1
	Mittelwert		<0,46	0,46	0,63	1,06	2,16	3,39	5,00	7,40	11,88	60,3	2,7	1,7	1,3	2,0	2,1	3,5	8,4	18,0
	MWL	V29	<0,47	0,47	0,64	1,07	2,17	3,41	5,02	7,43	11,93	84,0	3,6	2,3	1,8	2,6	1,6	1,3	1,0	1,7
		V30	<0,47	0,47	0,64	1,07	2,17	3,40	5,00	7,40	11,88	82,3	5,0	3,0	1,9	1,8	1,4	1,1	0,8	2,7
	Mittelwert		<0,47	0,47	0,64	1,07	2,17	3,40	5,01	7,41	11,90	83,2	4,3	2,7	1,9	2,2	1,5	1,2	0,9	2,2
	KWL	V31	<0,56	0,56	0,76	1,25	2,51	3,92	5,77	8,52	13,66	77,6	4,2	3,3	2,6	2,8	2,3	2,8	2,0	2,3
		V33	<0,54	0,54	0,73	1,20	2,42	3,79	5,57	8,23	13,20	78,6	5,0	3,3	2,5	2,6	1,9	1,9	2,0	2,1
	Mittelwert		<0,55	0,55	0,74	1,22	2,47	3,86	5,67	8,38	13,43	78,1	4,6	3,3	2,6	2,7	2,1	2,3	2,0	2,2
Pelletkessel	NWL	V03	<0,47	0,47	0,64	1,06	2,16	3,38	4,98	7,37	11,83	58,2	2,4	2,1	3,2	5,4	6,9	9,5	6,5	5,7
		V04	<0,46	0,46	0,64	1,06	2,15	3,38	4,97	7,36	11,82	59,9	0,9	1,8	4,7	7,3	8,2	12,7	3,3	1,0
	Mittelwert		<0,47	0,47	0,64	1,06	2,15	3,38	4,98	7,36	11,82	59,1	1,7	2,0	3,9	6,4	7,6	11,1	4,9	3,4
	MWL	V05	<0,49	0,49	0,66	1,09	2,22	3,47	5,11	7,56	12,13	82,0	4,4	2,8	1,5	2,3	2,2	2,8	1,3	0,6
		V10	<0,50	0,50	0,68	1,13	2,28	3,58	5,26	7,77	12,47	83,7	3,9	2,4	1,6	2,1	2,0	2,3	1,2	0,8
	Mittelwert		<0,49	0,49	0,67	1,11	2,25	3,52	5,19	7,67	12,30	82,9	4,2	2,6	1,5	2,2	2,1	2,6	1,3	0,7
	KWL	V02	<0,52	0,52	0,71	1,16	2,34	3,66	5,37	7,94	12,73	85,1	4,1	2,6	1,5	1,7	1,6	1,6	0,6	1,0
		V07	<0,51	0,51	0,69	1,13	2,28	3,57	5,24	7,75	12,42	85,2	4,3	2,4	1,9	1,8	1,9	1,7	0,6	0,3
	Mittelwert		<0,51	0,51	0,70	1,15	2,31	3,61	5,31	7,84	12,58	85,2	4,2	2,5	1,7	1,8	1,8	1,6	0,6	0,6

7.5 Randbedingungen bei der Partikelprobenahme

7.5.1 Parameter der Feinstaubprobenahme - Impaktor

Bezeichnung	Leistung	Impaktor	Probenahme-dauer	Abgas-temperatur[1)]	Sauerstoffge-halt[1)]	Abgas-Geschwindig-keit[1)]	Probenahme-geschwindig-keit	Volumenstrom	Volumen	Normvolumen	Beladung (ohne Konus)	Beladung (mit Konus)
			(min)	(°C)	(%)	(m/s)	(m/s)	(m³/h)	(m³)	(Nm³)	(mg)	(mg)
Stückholzkessel "modern"	NWL	V11	228	176	8,9	3,8	4,1	1,035	3,932	2,035	64,36	78,27
		V14	176	181	8,4	3,6	3,7	0,950	2,786	1,422	65,82	89,17
	Mittelwert		202	179	8,7	3,7	3,9	0,993	3,359	1,729	65,09	83,72
	KWL	V12	128	124	9,0	1,9	1,9	0,861	1,837	1,076	24,44	25,09
		V1617	310	122	9,1	2,1	1,7	0,794	4,104	2,425	81,42	90,52
	Mittelwert		219	123	9,0	2,0	1,8	0,828	2,971	1,751	52,93	57,81
Stückholzkessel "modern" (Buche)	KWL	V18	200	128	8,6	2,2	1,7	0,817	2,725	1,552	35,72	37,86
		V19	261	125	8,5	2,1	1,7	0,818	3,558	2,041	33,62	34,20
	Mittelwert		231	127	8,6	2,2	1,7	0,818	3,142	1,797	34,67	36,03
Stückholzkessel "alte Technik" [1)]	NWL	V37	66	49	5,3	7,3	5,9	0,820	0,820	0,640	27,81	n.b.
		V40	63	53	6,0	7,8	6,2	0,862	0,862	0,672	17,09	n.b.
	Mittelwert		65	51	5,6	7,6	6,1	0,841	0,841	0,656	22,45	n.b.
	KWL	V41	63	52	6,5	6,7	6,3	0,870	0,870	0,683	12,39	n.b.
		V42	60	47	6,1	9,4	5,5	0,765	0,765	0,613	29,21	n.b.
		V43	59	50	6,2	8,0	5,5	0,757	0,757	0,600	12,37	n.b.
	Mittelwert		61	50	6,3	8,0	5,8	0,797	0,797	0,632	17,99	n.b.
Hackgutkessel w=15	NWL	V25	100	227	6,2	6,2	5,6	1,013	1,688	0,787	37,77	69,79
		V26	120	226	6,4	6,2	5,5	0,995	1,990	0,904	34,17	50,98
	Mittelwert		110	227	6,3	6,2	5,6	1,004	1,839	0,846	35,97	60,39
	MWL	V23	180	163	8,4	4,0	3,3	0,929	2,786	1,477	38,00	39,51
		V24	150	165	8,3	3,9	3,2	0,891	2,227	1,175	35,19	37,37
	Mittelwert		165	164	8,4	4,0	3,2	0,910	2,507	1,326	36,60	38,44
	KWL	V27	190	131	14,7	2,9	3,4	0,962	3,048	1,841	24,95	26,97
		V28	181	125	15,6	2,7	3,0	0,848	2,558	1,581	33,64	33,79

Bezeichnung	Leistung	Impaktor	Probenahme-dauer	Abgas-temperatur[1)]	Sauerstoffge-halt[1)]	Abgas-Geschwindig-keit[1)]	Probenahme-geschwindig-keit	Volumenstrom	Volumen	Normvolumen	Beladung (ohne Konus)	Beladung (mit Konus)
			(min)	(°C)	(%)	(m/s)	(m/s)	(m³/h)	(m³)	(Nm³)	(mg)	(mg)
	Mittelwert		186	128	15,2	2,8	3,2	0,905	2,803	1,711	29,30	30,38
Hackgutkessel w=35	NWL	V34	120	217	6,8	7,3	7,7	1,065	2,130	0,930	25,05	33,87
		V35	120	220	6,4	6,7	7,7	1,072	2,144	0,926	32,52	52,01
	Mittelwert		120	219	6,6	7,0	7,7	1,069	2,137	0,928	28,79	42,94
	MWL	V29	240	170	8,4	4,1	5,6	1,010	4,040	1,990	33,79	35,09
		V30	210	169	8,6	3,9	5,6	1,019	3,566	1,768	43,13	44,36
	Mittelwert		225	170	8,5	4,0	5,6	1,015	3,803	1,879	38,46	39,72
	KWL	V31	64	121	14,4	2,6	2,7	0,765	0,816	0,492	14,18	14,59
		V33	63	124	14,7	2,7	2,9	0,826	0,867	0,521	16,51	16,68
	Mittelwert		64	123	14,6	2,7	2,8	0,796	0,842	0,507	15,35	15,64
Pelletkessel	NWL	V03	180	167	7,8	2,2	2,3	1,050	3,149	1,652	38,33	50,81
		V04	180	169	7,8	2,2	2,3	1,055	3,166	1,653	27,29	39,34
	Mittelwert		180	168	7,8	2,2	2,3	1,053	3,158	1,653	32,81	45,07
	MWL	V05	182	140	9,6	1,5	2,1	0,974	2,954	1,664	31,26	32,98
		V10	175	134	9,4	1,7	2,0	0,912	2,660	1,524	30,14	31,98
	Mittelwert		179	137	9,5	1,6	2,1	0,943	2,807	1,594	30,70	32,48
	KWL	V02	153	103	10,9	2,9	1,9	0,843	2,150	1,345	23,49	23,49
		V07	241	109	11,0	1,1	2,0	0,895	3,594	2,223	38,72	39,29
	Mittelwert		197	106	11,0	2,0	1,9	0,869	2,872	1,784	31,11	31,39

[1)] Angaben beziehen sich auf die Meßstelle im mit Umgebungsluft verdünnten Abgas; k.A. keine Angaben

7.5.2 Parameter der Gesamtstaubprobenahme - Filterkopfgerät

Bezeichnung		Impaktor	Dauer	Abgas-temperatur[1)]	Sauerstoffgehalt[1)]	Abgas-Geschwindigkeit[1)]	Probenahme-geschwindigkeit	Norm-volumen	Gesamt-Beladung	Konzentration (bei 13 % O_2)
			(min)	(°C)	()	(m/s)	(m/s)	(Nm^3)	(mg)	(mg/Nm^3)
Stückholzkessel "modern"	NWL	V11	150	176	8,9	3,8	4,0	2068	82,3	28,6
		V14	149	181	8,4	3,6	4,0	2048	140	40,4
	Mittelwert		150	179	8,7	3,7	4,0	2058	111	34,5
	KWL	V12	126	124	9,0	1,9	2,1	1595	34,9	14,3
		V1617	310	122	9,1	2,1	2,1	4133	163	26,3
	Mittelwert		218	123	9,0	2,0	2,1	2864	98,7	20,3
Stückholzkessel "modern" (Buche)	KWL	V18	195	128	8,6	2,2	1,9	2154	50,9	14,0
		V19	256	125	8,5	2,1	1,8	2686	50,1	12,1
	Mittelwert		226	127	8,6	2,2	1,8	2420	50,5	13,1
Stückholzkessel "alte Technik"	NWL	V37	66	49	5,3	7,3	3,9	458	18,7	172
		V40	63	53	6,0	7,8	6,7	744	20,0	115
	Mittelwert		65	51	5,6	7,6	5,3	601	19,4	143
	KWL	V41	63	52	6,5	6,7	4,9	600	14,1	117
		V42	60	47	6,1	9,4	2,9	312	15,1	222
		V43	59	50	6,2	8,0	5,2	596	12,5	119
	Mittelwert		61	50	6,3	8,0	4,3	503	13,9	153
Hackgutkessel w=15	NWL	V25	99	227	6,2	6,2	5,8	1782	116	36,4
		V26	115	226	6,4	6,2	5,6	2006	97,6	27,5
	Mittelwert		107	227	6,3	6,2	5,7	1894	107	32,0
	MWL	V23	135	163	8,4	4,0	4,5	2181	75,2	21,9
		V24	146	165	8,3	3,9	4,6	2398	83,3	21,9
	Mittelwert		141	164	8,4	4,0	4,5	2290	79,3	21,9
	KWL	V27	187	131	14,7	2,9	4,0	3018	60,1	24,8
		V28	180	125	15,6	2,7	4,0	2940	83,0	43,1
	Mittelwert		184	128	15,2	2,8	4,0	2979	71,6	34,0

Bezeichnung		Impaktor	Dauer	Abgas-temperatur[1)]	Sauerstoffgehalt[1)]	Abgas-Geschwindigkeit[1)]	Probenahme-geschwindigkeit	Norm-volumen	Gesamt-Beladung	Konzentration (bei 13 % O_2)
			(min)	(°C)	()	(m/s)	(m/s)	(Nm^3)	(mg)	(mg/Nm^3)
Hackgutkessel w=35	NWL	V34	90,0	217	6,8	7,3	7,7	1871	57,1	17,7
		V35	116	220	6,4	6,7	8,3	2013	69,9	19,0
	Mittelwert		103	219	6,6	7,0	8,0	1942	63,5	18,4
	MWL	V29	180	170	8,4	4,1	5,4	3294	58,7	11,3
		V30	180	169	8,6	3,9	5,2	3216	72,3	14,5
	Mittelwert		180	170	8,5	4,0	5,3	3255	65,5	12,9
	KWL	V31	64,0	121	14,4	2,6	3,2	810	17,0	25,4
		V33	63,0	124	14,7	2,7	3,2	809	28,1	44,1
	Mittelwert		63,5	123	14,6	2,7	3,2	810	22,6	34,8
Pelletkessel	NWL	V03	120	167	7,8	2,2	2,4	1596	50,0	19,0
		V04	132	169	7,8	2,2	2,3	1656	53,0	19,3
	Mittelwert		126	168	7,8	2,2	2,3	1626	51,5	19,2
	MWL	V05	126	140	9,6	1,5	1,7	1830	39,5	15,3
		V10	150	134	9,4	1,7	1,6	2110	42,4	14,0
	Mittelwert		138	137	9,5	1,6	1,6	1970	41,0	14,7
	KWL	V02	60,0	103	10,9	2,9	1,1	878	16,4	14,6
		V07	136	109	11,0	1,1	1,1	1850	35,0	15,2
	Mittelwert		98,0	106	11,0	2,0	1,1	1364	25,7	14,9

[1)] Angaben beziehen sich auf die Meßstelle im mit Umgebungsluft verdünnten Abgas; k.A. keine Angaben

7.5.3 Filterkonditionierung bei der Gesamt- und Feinstaubprobenahme

Ermittlung der partikelförmigen Emissionen – Gesamtstaub	
Verfahren	VDI 2066, Blatt 1 u. 2
Probenahmegerät	Filterkopfgerät gemäß VDI 2066, Fa. Ecoplan, Donzdorf; außenliegend, beheizt
Abscheidemedium	Quarzfaser-Filterhülse, Munktell ET/MK360
Konditionierung und Auswertung des Abscheidemediums	
Allgemeine Angaben	
Wägeraum	nicht klimatisiert
Waage	Mettler, Typ AE163, Auflösung 0,01mg
Transport	Exsikkator
Trocknungsparameter	
vor Beprobung	240 °C, 1 h; Exsikkator 12 h; unmittelbar anschließende Wägung
nach Beprobung	105 °C, 1 h, Exsikkator 12 h; unmittelbar anschließende Wägung
Bemerkungen	---

Ermittlung der partikelförmigen Emissionen – Feinstaub	
Verfahren	VDI 2066, Blatt 1 u. 5
Probenahmegerät	Kaskadenimpaktor Andersen Mark III mit Schwanenhalssonde, außenliegend, beheizt (leihweise Überlassung des IVD)
Abscheidemedium	Reeve Angel (Stufen), Whatman (Endfilter)
Konditionierung und Auswertung des Abscheidemediums	
Allgemeine Angaben	
Wägeraum	Nicht klimatisiert
Waage	Mettler, Typ AE163, Auflösung 0,01mg
Aufbewahrung	Kunststoff-Petrischalen mit Wägeschälchen aus Aluminiumfolie
Transport	wie Aufbewahrung
Trocknungsparameter	
vor Beprobung	240 °C, 1 h; Exsikkator 12 h; unmittelbar anschließende Wägung
nach Beprobung	Exsikkator 12 h bei Raumtemperatur (20 °C); unmittelbar anschließende Wägung
Ermittlung des Staubanteils im Übergangsteil	
Schwanenhalssonde und Konus	Lose anhaftender Staub wurde durch leichtes Klopfen entfernt.
Bemerkungen	Nach der Beprobung wurden die Filter nur im Exsikkator konditioniert, um Masseverluste durch häufiges Bewegen zu vermeiden

Teil IV: Anlagen der Kleinverbraucher

Die Bearbeitung von Teil IV erfolgte durch:



Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

der Universität Stuttgart

(Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. R.G. Hein)

Ulrich Zuberbühler

Günter Baumbach

Pfaffenwaldring 23, D-70569 Stuttgart

Tel. 0711-685-3493, Fax.: 0711-685-3491

Internet: http://www.ivd.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

Seite:

1 Einleitung ... 279

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung ... 279

3 Untersuchungsprogramm ... 279

3.1 Messungen an Praxisanlagen ... 280

3.2 Parameterstudie an Versuchsanlage ... 280

3.3 Praxisanlage Vorschubrostfeuerung 450 kW (Neuanlage) ... 281

3.4 Praxisanlage Unterschubfeuerung 430 kW (ältere Anlage) ... 282

3.5 Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage) ... 283

3.6 Eingesetzte Messverfahren und Versuchsauswertung ... 284

3.7 Eingesetzte Brennstoffe ... 285

4 Bisherige Untersuchungsergebnisse ... 285

4.1 175 kW Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider ... 285

4.2 150 kW Unterschubfeuerung (gestufte Verbrennung, int. Partikelabscheidung) ... 287

4.3 450 kW Vorschubrostfeuerung (unterschiedliche Feuerungsleistungen) ... 291

5 Neue Untersuchungsergebnisse ... 293

5.1 Praxisanlage Vorschubrostfeuerung 450 kW (Neuanlage) ... 293

5.2 Praxisanlage Unterschubfeuerung 430 kW (ältere Anlage) ... 296

5.3 Versuchsanlage - Einfluss des Luftüberschusses ... 299

5.4 Versuchsanlage - Einfluss der Feuerungsleistung und Auswirkung der Abgasreinigung mittels Gewebefilter ... 302

6 Zusammengefasste Ergebnisse ... 306

7 Literatur ... 309

8 Anhang ... 310

1 Einleitung

Die Emissionen mechanisch beschickter Holzfeuerungen unterliegen vielfältigen Einflussfaktoren. In erster Linie werden die Emissionen von den Prozessbedingungen bei der Verbrennung beeinflusst. Diese hängen wiederum von der Art der Feuerungsanlage, der Art des Brennstoffes und den Betriebsbedingungen der Feuerung ab. Da sich die unterschiedlichen Einflüsse überlagern, wurden bei diesen Untersuchungen sowohl Parameterstudien auf dem institutseigenen Versuchsstand, als auch Emissionsmessungen an Praxisanlagen durchgeführt, die besonders den Einfluss realer Betriebsbedingungen repräsentieren.

Die Untersuchung von Einflussfaktoren auf das Emissionsverhalten automatisch beschickter Holzfeuerungen sind an Praxisanlagen nur mit hohem Aufwand durchzuführen, da der normale Betriebsablauf in der Regel nicht gestört werden darf. Aus diesem Grund wurden die Parameterstudien, wie z.B. die Variation der Wärmeleistung der Feuerung (Betrieb im Bereich der Nennwärmeleistung, auch als Nennlastbetrieb oder Volllast bezeichnet, sowie Betrieb bei Teillast) oder die Änderung des Luftüberschusses bei der Verbrennung, an der Versuchsanlage durchgeführt.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung und Zielsetzung umfasst zwei Bereiche: Zum einen soll mit Messungen an repräsentativen Praxisanlagen die momentane Emissionssituation erfasst und zum anderen die Einflussgrößen auf die Partikelemissionen an einer Versuchsanlage bestimmt werden. Ziel der Parameterstudien ist es, durch Variation ausgesuchter Parameter die Größen zu bestimmen, welche die Partikelemissionen bei der Verbrennung in mechanisch beschickten Anlagen wesentlich beeinflussen. Vorrangiges Ziel der Untersuchungen an den Praxisanlagen ist es, den Einfluss der Betriebsweise, z.B. durch den Tagesgang der abgenommenen Wärmeleistung, auf die Partikelemissionen zu erfassen. Ergänzend zu den Parameteruntersuchungen und den Messungen an installierten Feuerungsanlagen werden auch die Auswirkungen eines Gewebefilters auf die Partikelemissionen untersucht. Die Ergebnisse dienen zur Abschätzung eines Emissionsminderungspotentials.

3 Untersuchungsprogramm

Bei der Aufstellung des Untersuchungsprogramms konnte auf die Erfahrungen von bereits im Rahmen anderer Vorhaben durchgeführten Forschungsarbeiten bezüglich der Partikelemissionen sowie auf Messungen an Praxisanlagen zurückgegriffen werden (BAUMBACH et al. 1999, HASLER & NUSSBAUMER 1997). Da bei den durchgeführten Praxismessungen vor allem die Auswirkungen einer realen Betriebsweise erfasst werden sollten, wurden die Probenahmezeiträume so gewählt, dass z.B. ein Tagesgang der abgenommenen Wärmeleistung bei den Messungen berücksichtigt wurde. Bei den Parameterstudien auf dem eigenen

Versuchsstand erfolgte eine Variation des Luftüberschusses bei sonst weitgehend gleichen Versuchsbedingungen. Im weiteren wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Anlagenlast und der Einsatz eines Gewebefilters auf die Partikelemissionen untersucht. Die Versuchsmatrix der im Bereich Kleinverbraucher durchgeführten Versuche ist in **Tabelle 3.1** dargestellt.

Tabelle 3.1: Versuchsmatrix bei Anlagen der Kleinverbraucher (Nennwärmeleistungen > 100 kW). Messungen wurden an Praxisanlagen und auf dem Prüfstand durchgeführt. Die Partikelprobenahme erfolgte im unverdünnten Abgas

Anlage	Brennstoffe	Anzahl der Partikelmessungen bei betriebsüblichem Lastbereich	
		hoch	niedrig
Vorschubrostfeuerung 450 kW (Praxismessungen an Neuanlage)	naturbelassene Hackschnitzel (feuchter Brennstoff)	2	2
Unterschubfeuerung 430 kW (Praxismessungen an älterer Anlage)	Holzwerkstoffe, dort übliche Holzreste (trockener Brennstoff)	2	2
Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage)	beschichtete Spanplatten (trockener Brennstoff)	12	12
	Summe	**16**	**16**

3.1 Messungen an Praxisanlagen

Bei Kleinverbrauchern gibt es zwei große Bereiche, in denen zunehmend Holzfeuerungen großer Leistung eingesetzt werden. Dies ist zum einen der kommunale Bereich (z.B. Schulen, öffentliche Gebäude, Bauhöfe, usw.) wo vorwiegend naturbelassene, aber relativ feuchte Brennstoffe eingesetzt werden und zum anderen der gewerbliche Bereich, wo in der Regel trockene Holzwerkstoffreste verbrannt werden. Diese beiden Bereiche unterscheiden sich wesentlich in den eingesetzten Brennstoffen und der verwendeten Feuerungstechnik. Beide Einsatzbereiche wurden durch jeweils eine repräsentative Praxisanlage abgedeckt, einer Vorschubrostfeuerung mit 450 kW Nennwärmeleistung aus dem kommunalen Bereich und einer Unterschubfeuerung mit 430 kW Nennwärmeleistung aus dem gewerblichen Bereich. Die Probenahmezeit für eine Messung der Partikel-Größenverteilung betrug ca. eine Stunde. Mit der Vor- und Nachbereitung konnten ca. vier Messungen am einem Messtag durchgeführt werden. Die Probenahmezeiten wurden so gewählt, dass diese die Partikelemissionen während eines typischen Betriebstages wiedergeben.

3.2 Parameterstudie an Versuchsanlage

Praxisanlagen in der Größenordnung von ca. 500 kW werden meist direkt aus einem Brennstoffsilo bestückt, so dass in der Regel nicht die Möglichkeit besteht, den Brennstoff zu variieren. Generell sind an Praxisanlagen Manipulationen nur mit hohem Aufwand durchzuführen und vom Betreiber nicht gern gesehen, da der normale Betriebsablauf nicht gestört werden darf. Aus diesem Grund wurden die Parameterstudien, wie z.B. die Variation Voll-

last/Teillast, Änderung des Luftüberschusses bei der Verbrennung und der Brennstoffeinfluss an der Versuchsanlage (Unterschubfeuerung 150 kW) auf dem Prüfstand des Instituts durchgeführt, wodurch auf bestehende Erfahrungen und Messergebnisse aufgebaut werden konnte. Außerdem stand ein Gewebefilter zur Abgasreinigung zur Verfügung, das ebenfalls für diese Untersuchungen eingesetzt wurde.

In **Tabelle 3.2** ist die Versuchsmatrix für die Partikelmessungen bei der Parameterstudie und gezielter Veränderung einer Einflussgröße dargestellt. Grundvoraussetzung für den emissionsarmen Betrieb von automatisch beschickten Anlagen ist das Erzielen einer möglichst vollständigen Verbrennung mit CO Konzentrationen kleiner 250 mg/m³ im Abgas. Wird dies erreicht, liegen die Kohlenwasserstoff-Konzentrationen im Bereich kleiner 5 mg/m³, so dass die Partikelbildung durch Kondensation gasförmiger Kohlenwasserstoffe bei der Abkühlung der Abgase praktisch ausgeschlossen ist, was die direkte Probenahme im unverdünnten Abgas ermöglicht.

Tabelle 3.2: Versuchsmatrix bei der Parameterstudie an der Versuchsanlage mit beschichteten Spanplatten. Die Partikel-Probenahme erfolgte im unverdünnten Abgas

Versuch	Anzahl der Partikelmessungen im Lastbereich			
	hoch	mittel	niedrig	insgesamt
Variation des Luftüberschusses	2	2	2	6
Variation der Feuerungsleistung	2	2		4
Einsatz eines Gewebefilters	1 vor Filter		1 nach Filter	2
			Summe	**12**

3.3 Praxisanlage Vorschubrostfeuerung 450 kW (Neuanlage)

Die beiden häufigsten Bauformen von Rostfeuerungen sind Schubrost und Wanderrost Feuerungen. Im Bereich der Kleinverbraucher wird hauptsächlich die Schubrostfeuerung in verschiedenen Ausführungen eingesetzt. Im größeren Leistungsbereich bis 25 MW kommen auch andere Bauformen der Rostfeuerung wie z.B. Wanderrost, wassergekühlter Rost oder Wirbeldüsenboden (Rost) zur Anwendung, wie sie in MARUTZKY & SEEGER (1999) ausführlich beschrieben sind. In **Abbildung 3.1** ist die untersuchte Vorschubrostfeuerung mit automatischer Entaschung skizziert (SCHMID: Firmenprospekt).

Der Vorschubrost setzt sich aus feststehenden und beweglichen Rostelementen zusammen, die abwechselnd angeordnet sind. Durch eine periodische Vorschubbewegung, die oftmals im Hub und in der Geschwindigkeit variiert werden kann, wird ein kontinuierlicher Materialvorschub im Feuerraum von der Brennstoffaufgabe zum Ascheaustrag erzwungen. Vorschubrostfeuerungen werden vorwiegend für feuchte, aschereiche und eher grobe Brennstoffe eingesetzt.

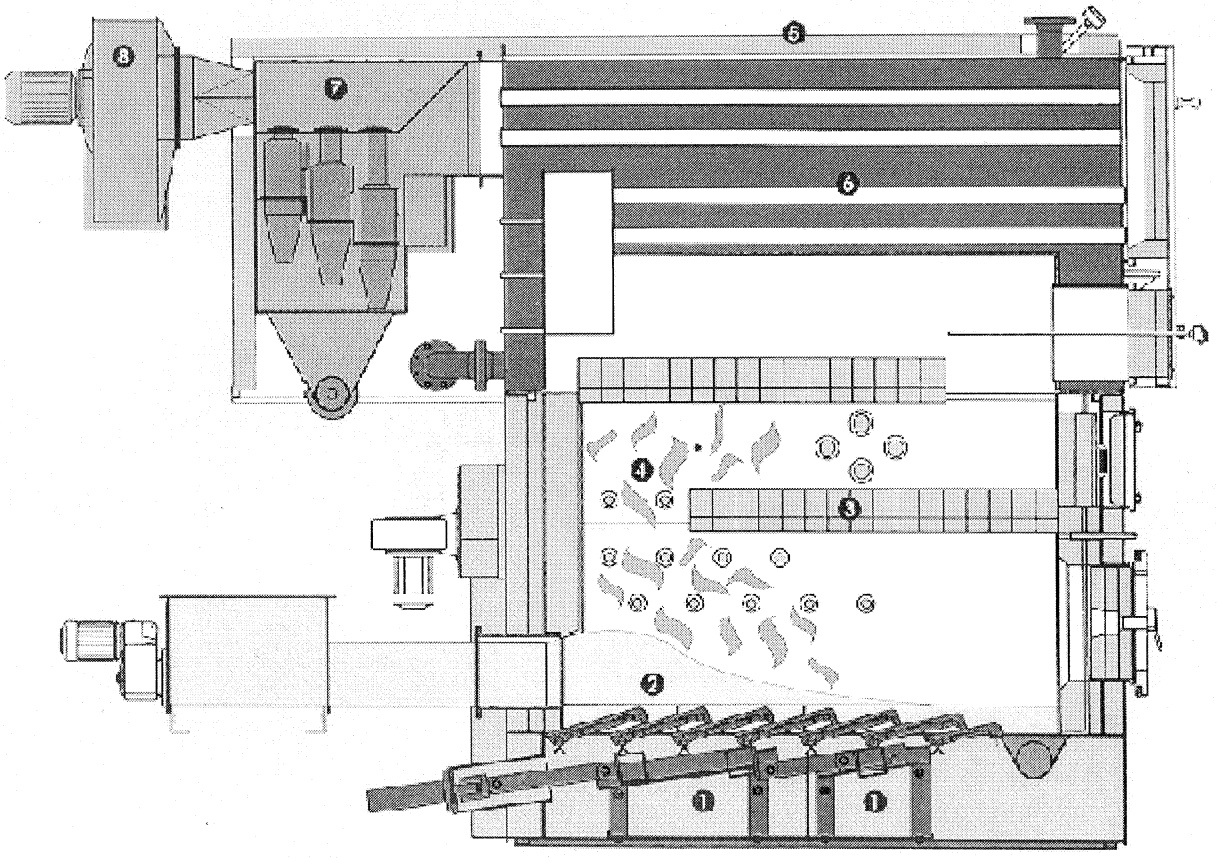


Abbildung 3.1: Vorschubrostfeuerung 450 kW, getrennte Primär- und Sekundärluftzuführung über Klappensteuerung, Temperatur-, Unterdruck- und λ-Regelung (Baujahr 1997, Niederdruckwasserkessel, SCHMID: Firmenprospekt)

Im Verhältnis zum Feuerraumvolumen verfügen die Vorschubrostfeuerungen über eine relativ große Rostfläche die es ermöglicht, den Brennstoff vor der eigentlichen Verbrennung im Feuerraum zu trocknen. Bei den Vorschubrostfeuerungen im kleineren Leistungsbereich wird der Brennstoff analog den Unterschubfeuerungen mit einem Schneckenförderer zugeführt.

3.4 Praxisanlage Unterschubfeuerung 430 kW (ältere Anlage)

Eine der gebräuchlichsten Bauformen im Bereich der gewerblichen Feuerungen ist die Unterschubfeuerung. In **Abbildung 3.2** ist die untersuchte Anlage exemplarisch für diese Bauformen dargestellt (NOLTING: Firmenprospekt). Im Anlagenbestand sowie im Handel sind zahlreiche Ausführungen dieser Bauart vorhanden bzw. erhältlich.

Bei dieser Bauart wird der zerkleinerte Brennstoff zusammen mit der Primärluft in eine Feuermulde zugeführt. Über der nach oben offenen Feuermulde erfolgt an den Feuerraumwänden die Sekundärluftzugabe. Die dargestellte Ausführung der Unterschubfeuerung verfügt über getrennte Primär- und Sekundärluftzuführungen.

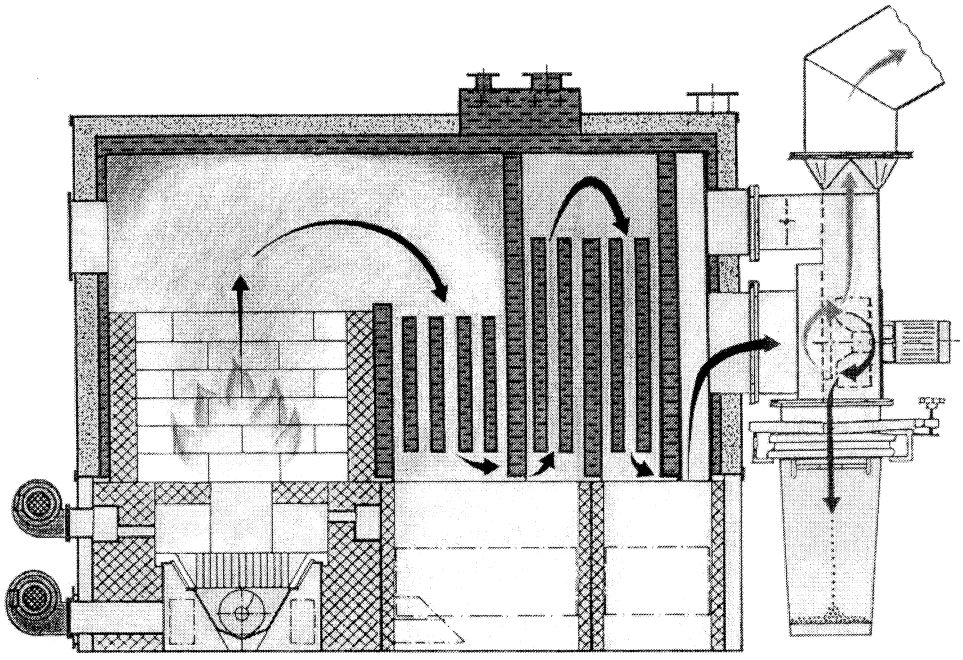


Abbildung 3.2: Unterschubfeuerung mit Einrichtung zur Abscheidung grober Stäube (Baujahr 1989, Niederdruckwasserkessel, NOLTING: Firmenprospekt)

Im weitesten Sinne handelt es sich dabei um eine „gestufte Verbrennung", wobei die Luftzuführungen bei der dargestellten Ausführung doch recht nahe beieinander liegen, so dass örtliche Unterschiede der Verbrennungsbedingungen, z.B. in aufeinanderfolgenden Feuerraumabschnitten, schlecht zu differenzieren sind.

Unterschubfeuerungen eignen sich besonders für trockene, aschearme Brennstoffe mit einer möglichst homogenen Stückgröße < 50 mm Kantenlänge. Neuerdings werden Unterschubfeuerungen mit kleinen Vorschubrosten kombiniert oder mit mechanischen Schiebern ausgerüstet, um einen automatisierten Ascheaustrag, z.B. über Förderschnecken, zu ermöglichen.

3.5 Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage)

In **Abbildung 3.3** ist die als Unterschubfeuerung konzipierte Versuchsanlage für zerkleinerte Festbrennstoffe dargestellt. Dabei handelt es sich um eine modifizierte Temperatur- und λ-geregelte Unterschubfeuerung mit einer Nennwärmeleistung von 150 kW. Die Abscheidung grober Partikel erfolgt bei dieser Anlage durch die Erzeugung einer Drallströmung bereits im Feuerraum und nicht, wie bei diesen Bauarten sonst üblich, durch einen Zyklonabscheider nach dem Wärmetauscher.

Der zerkleinerte Brennstoff wird, wie bei fast allen Anlagen dieser Bauart, aus einem Vorratsbehälter oder einem Silo über eine Schnecke dem Feuerraum zugeführt. Abweichend von der klassischen Unterschubfeuerung wird bei dieser Entwicklung der Brennstoff auf einen Rost gefördert, um eine möglichst homogene Verteilung der zugeführten Luft über die gesamte Brennstoffschüttung zu erreichen.

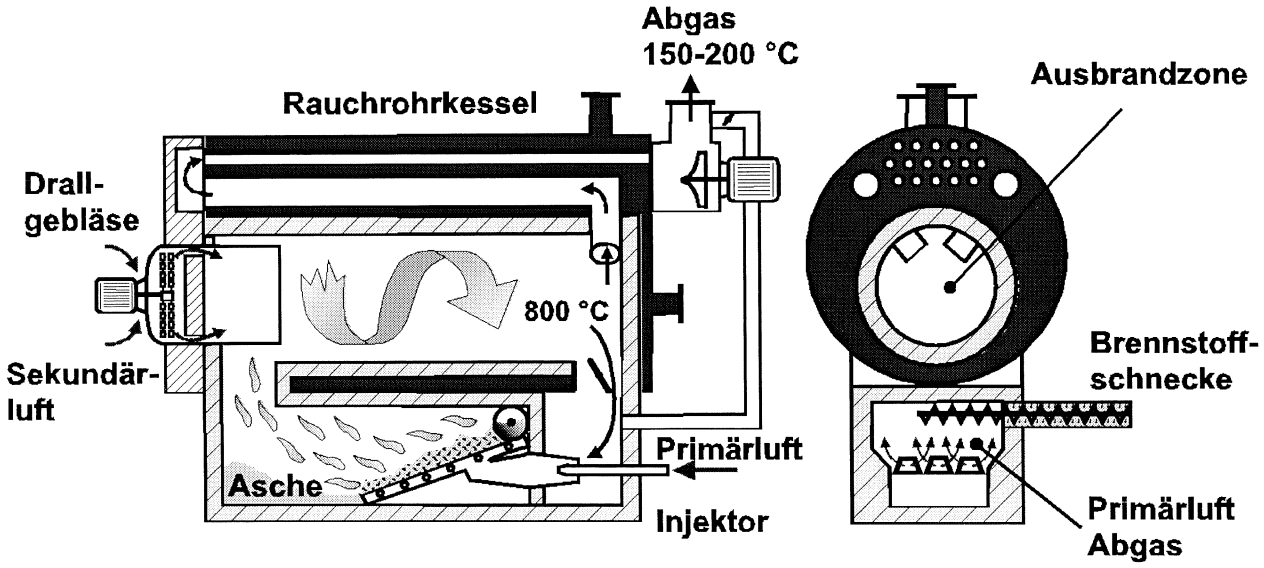


Abbildung 3.3: Unterschubfeuerung 150 kW (Versuchsanlage) mit gestufter Verbrennung und im Feuerraum integrierter Partikelabscheidung

Zur Überwindung des Druckverlustes der Rostelemente und der Brennstoffschüttung wurde ein Seitenkanalgebläse verwendet. Die Luftzuführung wurde als Injektor ausgeführt. Hierdurch kann, zusammen mit der Primärluft, heißes Gas vom Ende der Brennkammer oder bereits abgekühltes Abgas zurückgeführt werden.

3.6 Eingesetzte Messverfahren und Versuchsauswertung

Die zur Emissionsmessung verwendeten Messgeräte, die Messprinzipien und die Messbereiche sind in **Tabelle 3.3** zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Eingesetzte Messgeräte, deren Messprinzipien und eingestellte Messbereiche

Größe	Messgerät/Messbereich	Messprinzip
CO_2/CO	Binos 100 2M Messbereich: CO_2: 0 -20 Vol. % CO : 0 - 1000 ppm	Nichtdispersive Infrarot-Absorption
O_2	Binos 100 2M Messbereich: O_2: 0 - 25 Vol.%	Paramagnetismus des Sauerstoffes
VOC	Testa FID (Prüfgas: Propan) Messbereich: VOC: 0 - 100 ppm	Flammenionisation
NO_x	Thermo Electron Modell 14D/E Messbereich: NO_x: 0 - 1000 ppm	Chemilumineszenz
Partikel	Gothe Planfilterkopfgerät	Gravimetrische Bestimmung auf Quarzfaserfiltern nach VDI 2066
	Andersen Impaktor Mark III	Gravimetrische Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nach Impaktion der nach aerodynamischem Durchmesser separierten Partikel auf Glasfaserträgern

Das für die beschriebenen Untersuchungen herangezogene Messverfahren zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung, die Auswertung und die Möglichkeiten zur Darstellung der Messergebnisse sind in BAUMBACH et al. (1999) ausführlich beschrieben.

3.7 Eingesetzte Brennstoffe

An den Praxisanlagen wurde der dort übliche Brennstoff verwendet. Für die Parameterstudie an der Versuchsanlage wurden zerkleinerte, beschichtete Spanplattenreste als Brennstoff verwendet. Dadurch wurden die in holzbe- und -verarbeitenden Betrieben eingesetzten Brennstoffe gut repräsentiert. Außerdem wurden mit diesem Brennstoff bei vorangegangen Versuchen relativ hohe Partikelkonzentrationen im Abgas gemessen, was für die Untersuchung der Einflussgrößen auf die Partikelemission durchaus wünschenswert war.

In **Tabelle 3.4** sind die Analysenergebnisse der eingesetzten Brennstoffe aufgelistet. Am deutlichsten unterscheiden sich die Brennstoffe bezüglich ihres Feuchte, Asche- und Stickstoffgehalts.

Tabelle 3.4: Analysenwerte der eingesetzten Brennstoffe (mit Ausnahme der Brennstofffeuchte u beziehen sich alle Angaben auf die Trockenmasse)

Brennstoff	u	FlüchtB	FixedC	Asche	N	C	S	H	Cl
naturbelassen NB8	37 %	84,3 %	15,6 %	0,13 %	0,07 %	49,12 %	0,01 %	5,24 %	<0,1 %
naturbelassen NB14	20 %	85,3 %	14,6 %	0,05 %	0,03 %	50,46 %	0,05 %	5,49 %	0,02 %
naturbelassen NB20	82,7 %	79,9 %	18,3 %	1,78 %	0,4 %	50,88 %	0,14 %	6,85 %	0,03 %
naturbelassen NB21	50,2 %	79 %	16 %	0,55 %	0,48 %	49,87 %	0,20 %	6,85 %	0,03 %
naturbelassen NB22	11,5 %								
beschichtete SP9	22 %	79,3 %	19,1 %	1,61 %	4,02 %	48,04 %	0,06 %	5,47 %	<0,1 %
beschichtete SP18	23,1%	79 %	19,6 %	1,42 %	4,28 %	48,75 %	0,08 %	7,00 %	0,02 %
Schreinerei-Reste SR1	9 %	81,2 %	18 %	0,8%	1,47 %	49,74 %	n.n.	5,48 %	<0,03%
Buntstift-Reste BR17	8,2 %	81,1 %	17,2 %	1,71 %	0,28 %	53,17 %	0,15 %	6,29 %	0,01 %

NB = Naturbelassene Hackschnitzel
SP = Spanplatten
SR = Schreinerei-Reste
BR = Buntstift-Reste

Aufgrund von (Melamin-) Beschichtungen und (stickstoffhaltigen) Zusatzstoffen fallen bei den Spanplatten die Asche- und Stickstoffgehalte wesentlich höher aus als bei naturbelassenem Holz (MARUTZKY 1991).

4 Bisherige Untersuchungsergebnisse

4.1 175 kW Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider

Für die nachfolgend aufgeführten Messungen wurde eine Unterschubfeuerung mit 175 kW Nennwärmeleistung mit dem Baujahr 1995 und üblicher Bauweise mit λ- und Temperaturregelung verwendet. Bei diesen Feuerungen wird der Brennstoff in zerkleinerter Form mittels Schnecke in die Feuermulde gefördert, wo auch die Primärluft zugeführt wird. Obwohl die

Primär- und Sekundärluftzugabe über getrennte Gebläse erfolgt, ist hier eine gestufte Verbrennung nur ansatzweise realisiert. Grobe, unvollständig verbrannte Partikel werden nach dem Wärmetauscher in einem Zyklon abgeschieden.

An der 175 kW Unterschubfeuerung wurden die Partikel-Größenverteilungen bei kontinuierlichem Nennlastbetrieb mit zwei unterschiedlichen Brennstoffen bestimmt. Die Randbedingungen und die Emissionsmittelwerte während der Probenahmedauer der Impaktormessungen sind aus **Tabelle 4.1** ersichtlich.

Tabelle 4.1: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 175 kW Unterschubfeuerung (Messdauer jeweils ca. 1h)

Brennstoff	Brennstoff-nummer	Leistung	T-Mess	O_2	CO	NO_x	Partikelkonz.	
							Impaktor	Planfilter
		in kW	in °C	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
naturbel. Holz	NB8	177	150	8,4	23	124	34	24 *
Spanpl. beschichtet	SP9	139	140	10,9	29	751	55	75 *

* zeitversetzte Messung T-Mess = Temperatur an der Messstelle

Wie aus den CO-Konzentrationen in **Tabelle 4.1** ersichtlich ist, lagen mit beiden Brennstoffen vergleichbar gute Ausbrandbedingungen vor. Deutliche Unterschiede aufgrund der verschiedenen Brennstoffe ergaben sich bei den NO_x- und Gesamtpartikelkonzentrationen (Planfilter), die mit den beschichteten Spanplatten deutlich höhere Werte erreichten. Die Gesamtpartikelkonzentration wurde zum einen durch Addition der auf den einzelnen Impaktorstufen abgeschiedenen Massen und zum anderen mittels Planfilter nach VDI-Richtlinie 2066 bestimmt. Die Probenahme von Impaktor und Planfilter erfolgte versuchsbedingt zeitversetzt, was sicherlich zu den relativen großen Abweichungen der in **Tabelle 4.1** angegebenen Gesamtpartikelkonzentrationen zwischen Impaktor- und Planfiltermessung beitrug.

In **Abbildung 4.1** ist die Partikel-Größenverteilung im Abgas der 175 kW Unterschubfeuerung für die zwei untersuchten Brennstoffe dargestellt. Trotz deutlich unterschiedlicher Gesamtpartikelkonzentration unterscheiden sich die Partikel-Größenverteilungen der beiden Brennstoffe nur geringfügig im Bereich der feinen Partikel (< PM_1).

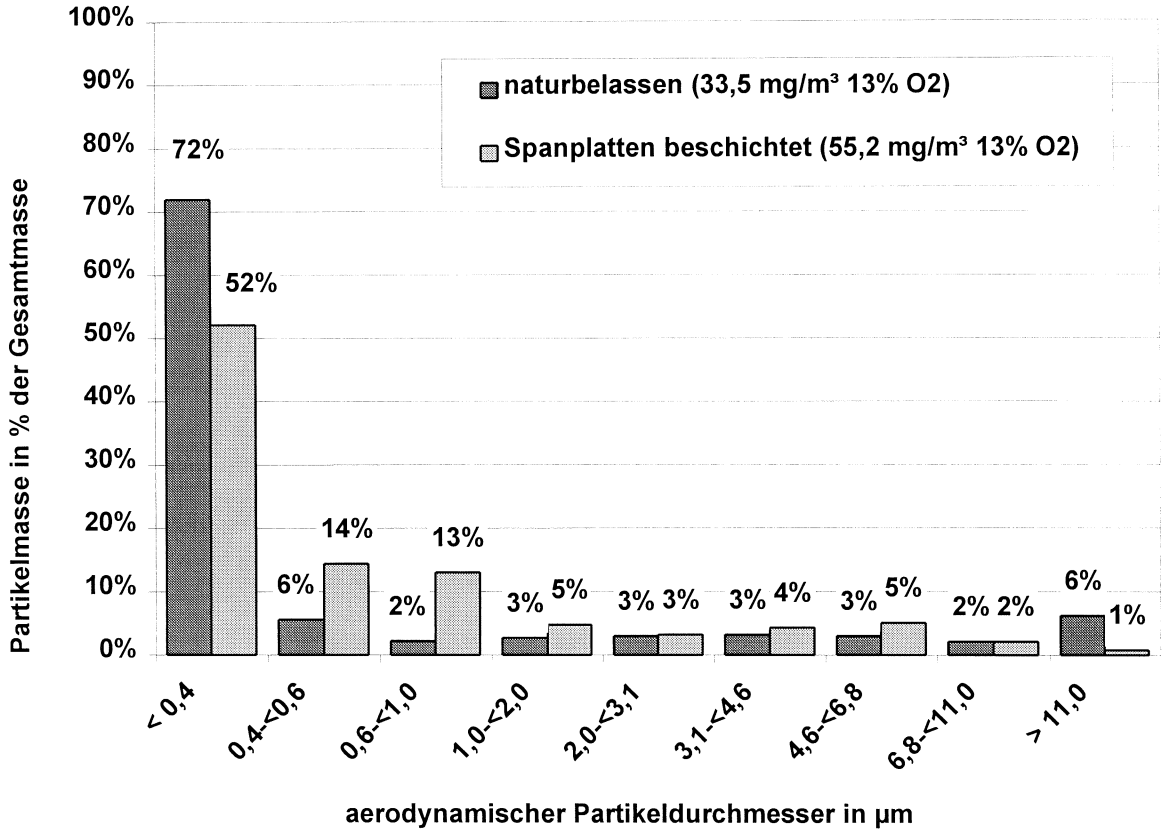


Abbildung 4.1: Partikel-Größenverteilung mit unterschiedlichen Brennstoffen im Abgas einer 175 kW Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider (Baujahr 1995, kontinuierlicher Vollastbetrieb)

In **Tabelle 4.2** sind die Anteile der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} dargestellt. Bei beiden untersuchten Brennstoffen sind die Anteile der einzelnen Partikelklassen nahezu identisch, wobei sich allerdings die Gesamtpartikelkonzentrationen deutlich unterscheiden.

Tabelle 4.2: Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} im Abgas der 175 kW Unterschubfeuerung für zwei verschiedene Brennstoffe

Brennstoff	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
naturbelassene Hackschnitzel	79,8 %	85,6 %	93,8 %	34 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
Spanplatten beschichtet	79,6 %	87,6 %	99,2 %	55 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

4.2 150 kW Unterschubfeuerung (gestufte Verbrennung, int. Partikelabscheidung)

Bei der in **Abbildung 4.2** dargestellten 150 kW Unterschubfeuerung ist durch einen räumlich getrennten Feuerraum eine gestufte Verbrennung realisiert. Im Primärbereich des Feuerraumes wird der Brennstoff zusammen mit der Primärluft auf einem Rost zugeführt. In der zylindrisch gestalteten Ausbrandzone wird die Sekundärluft über ein Drallgebläse zugeführt, wodurch in der Ausbrandzone eine schraubenförmige Gasströmung erzeugt wird, die zur

Partikelabscheidung dient. Bei dieser Bauweise kann auf eine nachgeschaltete Grobentstaubung, wie z.B. mit Zyklon oder Multizyklon, verzichtet werden.

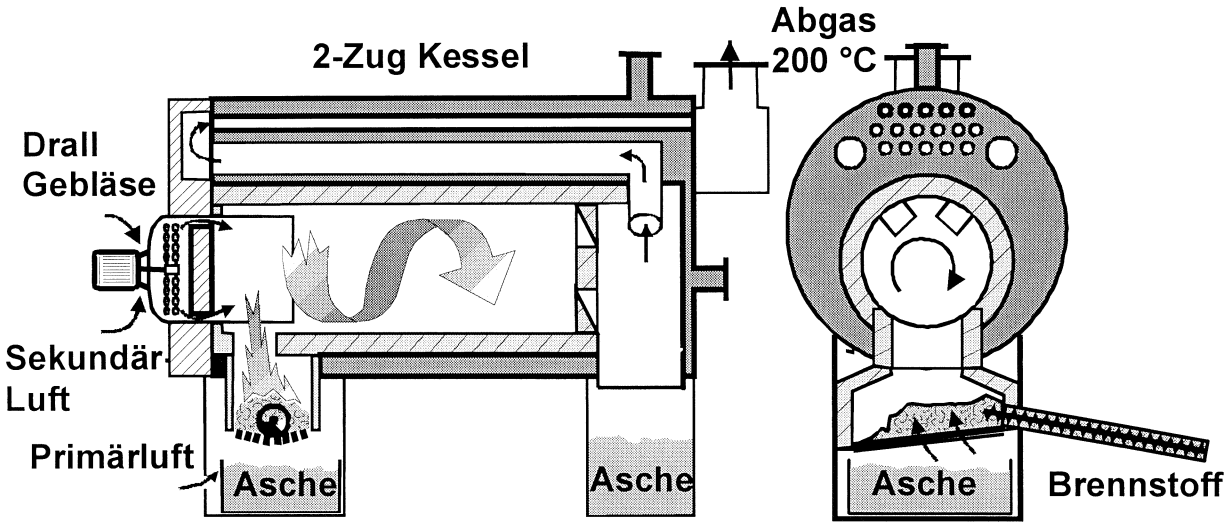


Abbildung 4.2: 150kW Unterschubfeuerung mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum (Baujahr 1998)

An dieser Feuerungsanlage wurden die Partikel-Größenverteilungen im kontinuierlichen Nennlastbetrieb mit drei unterschiedlichen Brennstoffen und bei Nenn- und Teillast mit naturbelassenen Hackschnitzeln bestimmt. Die Randbedingungen während dieser Versuche sind als Mittelwerte während der Probenahmedauer aus **Tabelle 4.3** ersichtlich. Die abgegebene Wärmeleistung im Teillastbetrieb betrug mit 43 kW ca. 30 % der Nennleistung.

Tabelle 4.3: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 150 kW Unterschubfeuerung mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum (Messdauer jeweils ca. 1h)

Brennstoff	Brennstoff-nummer	Leistung	T-Mess	O_2	CO	NO_x	Partikelkonz.	
							Impaktor	Planfilter
		in kW	in °C	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
Schreinerei-Reste	SR1	133	137	8,8	23	425	111	120 *
Buntstift-Reste	BR17	113	115	7,3	11	131	27	34 *
naturbel. Holz	NB14	148	141	11,1	28	132	26	23 *
naturbel. Holz TL	NB14	43	64	8,7	53	67	18	22 *

*zeitversetzte Messung TL = Teillast T-Mess = Temperatur Messstelle

Bei diesen Untersuchungen wurden versuchsbedingt zeitversetzt zu den Impaktormessungen auch die Gesamtpartikel-Konzentrationen mittels Planfilterkopfgerät in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 bestimmt. Die Abweichungen der mit dem Planfilterkopfgerät bestimmten und mit den Impaktorergebnissen berechneten Gesamt-Partikelkonzentrationen lagen bei diesen Messungen im üblichen Rahmen von 10 - 20 % (VDI 2066).

Bei allen Versuchen lagen, wie die CO-Konzentrationen zeigen, vergleichbar gute Ausbrandbedingungen vor. Somit waren im Abgas praktisch keine gasförmigen, kondensierbaren Kohlenwasserstoffe (Teer) enthalten. Der mit "Schreinerei-Reste" bezeichnete Brennstoff wies gegenüber den anderen aufgeführten Brennstoffen einen höheren Stickstoffgehalt auf, was an den deutlich höheren NO_x-Konzentrationen im Abgas ersichtlich wird. Auch die Gesamt-Partikelkonzentration war bei diesem Brennstoff gegenüber naturbelassenem Holz deutlich höher, was auf den höheren Aschegehalt und den höheren Feinanteil im Brennstoff zurückzuführen war.

In **Abbildung 4.3** sind für die 150 kW Unterschubfeuerung die Partikel-Größenverteilungen von drei der vier untersuchten Brennstoffe bei Volllast dargestellt.

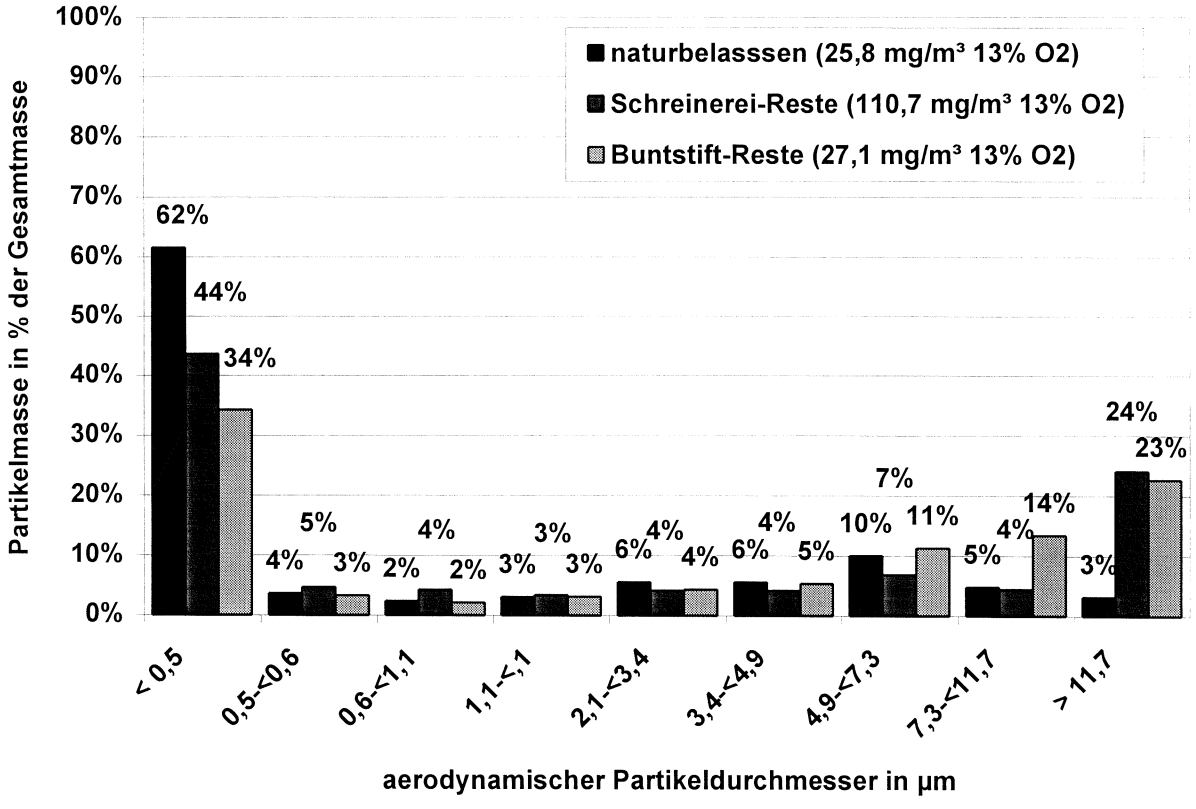


Abbildung 4.3: Partikel-Größenverteilung bei verschiedenen Brennstoffen (150 kW Unterschubfeuerung mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum, Volllast)

Beim Brennstoff "Buntstift-Reste" handelte es sich um sehr feine Späne mit einer geringen Schüttdichte, die beim Anspitzen von Buntstiften entstehen. Diese physikalischen Brennstoffbesonderheiten führten dazu, dass einzelne, unvollständig verbrannte Brennstoffflocken mit dem Abgas ausgetragen wurden, die dann auf der ersten Impaktorstufe bei aerodynamischen Partikeldurchmessern mit > 11,7 µm abgeschieden wurden und dort zu einer Erhöhung der abgeschiedenen Partikelmasse beitrugen. Dadurch ergibt sich für diesen Brennstoff eine vom naturbelassenen Holz abweichende Partikel-Größenverteilung.

Der Brennstoff "Schreinerei-Reste" enthielt ebenfalls feine, leichte Späne, so dass auch dort Flocken unvollständig verbrannten Brennstoffes auf der ersten Impaktorstufe vorhanden waren. Beim naturbelassenen Brennstoff handelte es sich um Hackschnitzel einer weitgehend homogenen Stückgröße. Dieser Brennstoff wies einen geringen Feinanteil auf, was sich in der niedrigen Gesamtpartikel-Konzentration und der dargestellten typischen Partikel-Größenverteilung ausdrückt.

Die Auswirkung unterschiedlicher Betriebsweisen, wie Voll- und Teillast, auf die Partikel-Größenverteilung ist in **Abbildung 4.4** für naturbelassene Hackschnitzel dargestellt.

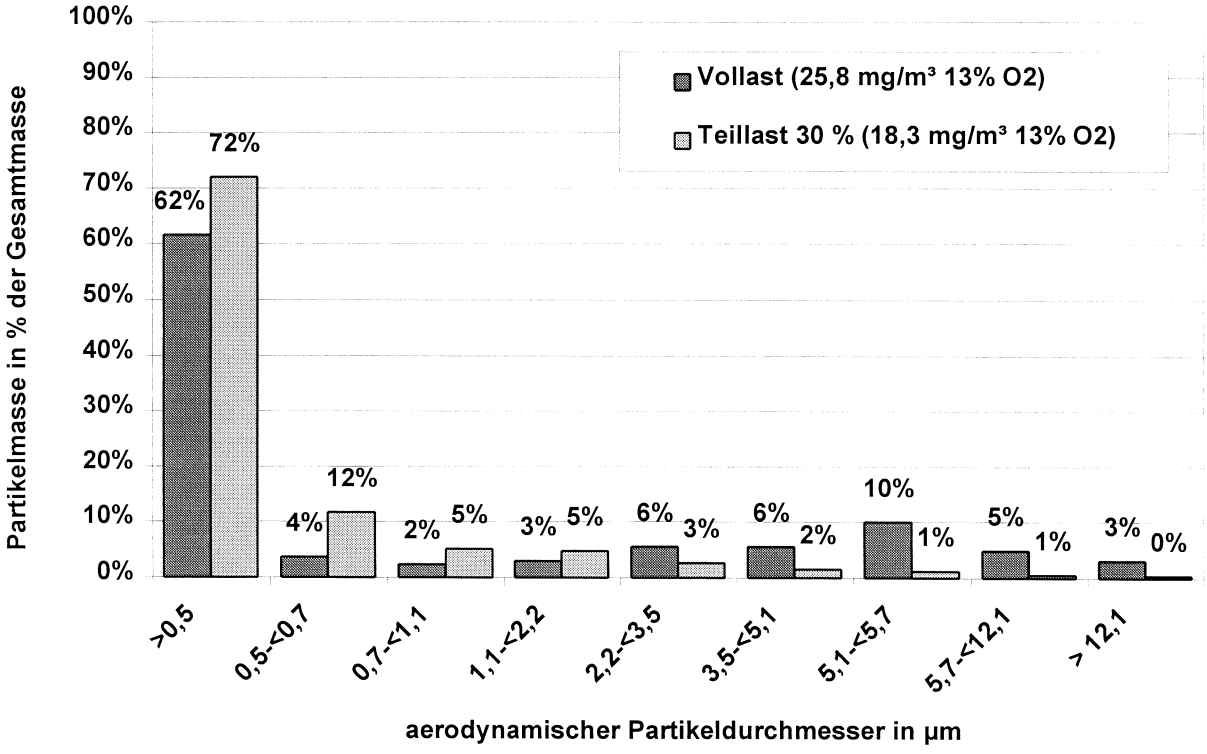


Abbildung 4.4: Partikel-Größenverteilung bei Voll- und Teillastbetrieb beim Verbrennen von naturbelassenen Hackschnitzeln (150 kW Unterschubfeuerung)

Im Teillastbetrieb wurde die Feuerung mit ca. 30 % der Nennwärmeleistung kontinuierlich betrieben. Auch in diesem Betriebszustand lagen gute Ausbrandbedingungen vor (CO < 100 mg/m³), so dass praktisch keine unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Abgas vorhanden waren, die als Teer an Partikeln im Abgas hätten kondensieren und evtl. die Gesamt-Partikelmasse und die Partikel-Größenverteilung beeinflussen können.

Im Teillastbetrieb ist eine leichte Verschiebung hin zu feineren Partikeln zu beobachten. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Feuerraum sind im Teillastbetrieb natürlich wesentlich geringer als bei Volllast, folglich ist auch der Austrag an groben Partikeln geringer, die sich auf der ersten Impaktorstufe bei aerodynamischen Partikeldurchmessern > 12,1 µm wiederfinden. Bei Volllast ergibt sich eine typische Verteilung der Partikelgrößen für naturbelassene

Hackschnitzel mit einem hohen Feinanteil (ca. 70 % < PM_1) und einem leichten Maximum im Bereich des aerodynamischen Durchmessers von 3 - 5 µm (BAUMBACH et al. 1999).

In **Tabelle 4.4** sind die Anteile der einzelnen Partikelklassen für die an der 150 kW Unterschubfeuerung untersuchten Brennstoffe dargestellt. Für die beiden Brennstoffe "Schreinerei- und Buntstift-Reste" ergaben sich in der Partikelklasse PM_1 relativ geringe Anteile an der Gesamtpartikelmasse, was durch unvollständig verbrannte Brennstoffflocken verursacht wurde, die auf der ersten Impaktorstufe abgeschieden wurden. Bei Teillast ergaben sich die typischen Massenanteile für alle PM-Klassen, da hier keine Brennstoffflocken ausgetragen wurden.

Tabelle 4.4: Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} im Abgas der 150 kW Unterschubfeuerung für unterschiedliche Brennstoffe und Lastzustände

Brennstoff	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
Schreinerei-Reste	52,7 %	60,3 %	75,9 %	110,6 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
Buntstift-Reste	39,7 %	47,1 %	77,3 %	27,1 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
naturbel. Holz Volllast	67,7 %	76,3 %	96,8 %	25,8 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
naturbel. Holz Teillast	88,9 %	96,3 %	99,6 %	18,3 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

4.3 450 kW Vorschubrostfeuerung (unterschiedliche Feuerungsleistungen)

Der Einfluss unterschiedlicher Anlagenleistung wurde anhand zweier Impaktormessungen an einer neueren Vorschubrostfeuerung mit Multizyklon-Staubabscheider und einer Nennwärmeleistung von 450 kW untersucht (BAUMBACH et al. 1999). Die Randbedingungen und Emissionsmittelwerte während der Impaktormessungen sind anhand der kontinuierlich gemessen Größen während der Probenahmedauer in **Tabelle 4.5** ersichtlich. Die abgegebene Wärmeleistung im Teillastbetrieb betrug ca. 60 % der Nennleistung.

Tabelle 4.5: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 450 kW Vorschubrostfeuerung mit Multizyklon-Staubabscheider (Messdauer je ca. 1h)

Last-zustand	Bennstoff-nummer	Leistung	T-Mess	O_2	CO	NOx	Partikelkonz.	
							Impaktor	Planfilter
		in kW	in °C	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
90 % Last	NB20	417	182	9,5	53	260	52	57 *
60 % Last	NB20	273	155	9,9	68	229	43	55 *

*zeitversetzte Messung T-Mess = Temperatur Messstelle

In **Abbildung 4.5** sind die Partikel-Größenverteilungen an der Vorschubrostfeuerung im Praxisbetrieb bei zwei verschiedenen Lastzuständen dargestellt. Im Gegensatz zu Abbildung 4.4 (150 kW Unterschubfeuerung), wo bei Teillast ein höherer Anteil feinerer Partikel bestimmt wurden, traten bei der Rostfeuerung bei Volllast feinere Partikel auf.

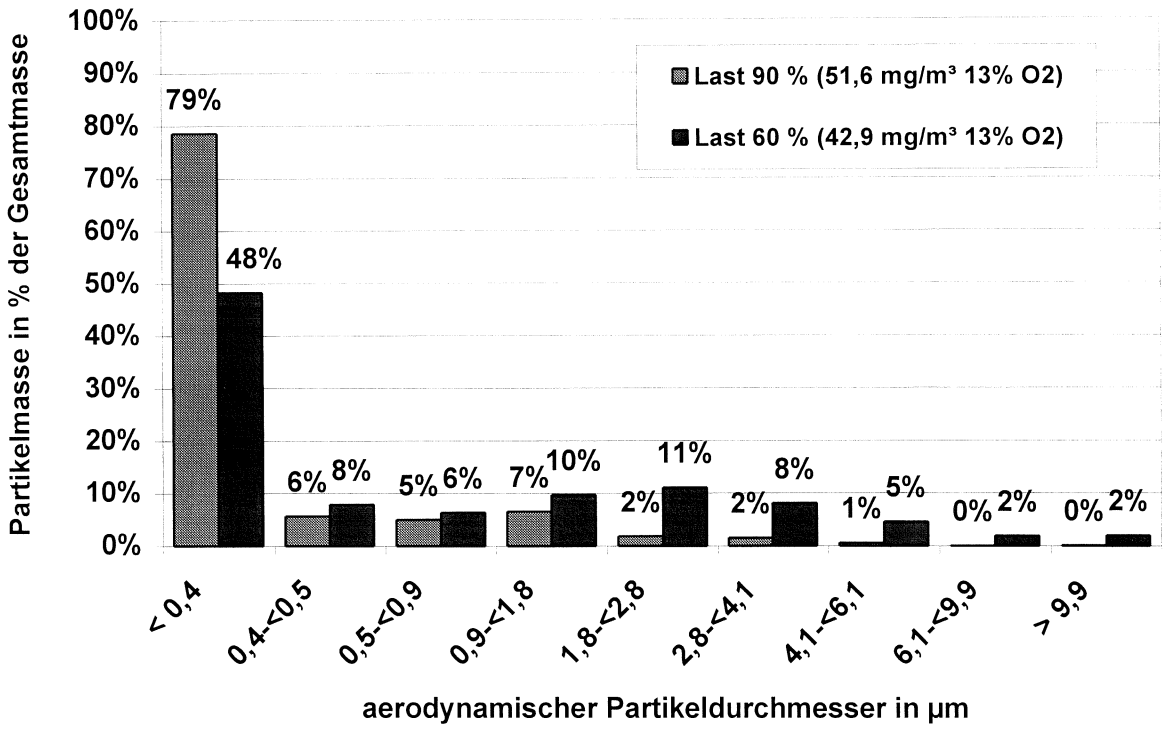


Abbildung 4.5: Partikel-Größenverteilung bei verschiedenen Lastzuständen an der 450 kW Vorschubrostfeuerung mit Multizyklon (Brennstoff: naturbelassene Hackschnitzel)

Die Trenngrenze eines Zyklon-Staubabscheiders hängt u.a. von der Gasgeschwindigkeit ab, mit der er durchströmt wird. Dies kann die Ursache dafür sein, dass sich die Partikel-Größenverteilung mit verminderter Last, also mit kleinerer Gasgeschwindigkeit im Zyklon, zu größeren Partikeln hin verschiebt.

Die Gesamtpartikel-Konzentration war sowohl bei der 150 kW Unterschubfeuerung als auch bei der 450 kW Vorschubrostfeuerung im Teillastbetrieb kleiner als bei Volllast, was auf die geringere Strömungsgeschwindigkeit im Feuerraum und dem somit verminderten Partikelaustrag zurückzuführen ist.

In **Tabelle 4.6** sind die Anteile der PM-Klassen bei den zwei verschiedenen Lastzuständen angegeben. Bei der Partikelklasse PM_{10} ist praktisch kein Unterschied zwischen den beiden Lastzuständen erkennbar. Für die Klasse PM_1 ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede. Mit steigender Anlagenleistung werden vermehrt sehr feine Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von <= 1 µm bei zunehmender Gesamtpartikel-Konzentration emittiert.

Tabelle 4.6: Partikelklassen PM_1, $PM_{2.5}$ und PM_{10} im Abgas der 450 kW Vorschubrostfeuerung im Praxisbetrieb bei verschiedenen Lastzuständen

Brennstoff: naturbelassene Hackschnitzel bei	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
90 % Last	89,3 %	97,8 %	99,9 %	52 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
60 % Last	72,3 %	91,5 %	100,0 %	43 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

5 Neue Untersuchungsergebnisse

5.1 Praxisanlage Vorschubrostfeuerung 450 kW (Neuanlage)

Diese Messungen dienen der Beschreibung des "Ist-Zustandes" einer neueren Praxisanlage, die in Verbindung mit einem kleinen BHKW und einem Ölkessel zur Beheizung einer Schulanlage mit angrenzender Sporthalle eingesetzt wird, woraus sich ein spezifischer zeit- und witterungsabhängiger Wärmebedarf ergibt. Die Messungen erfolgten im März 2000 an einem normalen Schultag mit Außentemperaturen zwischen 1 bis 8 °C im Messzeitraum.

Die Vorschubrostfeuerung ist in **Kapitel 3.3** beschrieben und verfügt über eine modulierende Leistungsregelung (λ- und Temperaturregelung) bei der Brennstoff- und Luftmenge dem jeweiligen Wärmebedarf angepasst werden. Das typische Betriebsverhalten der Feuerungsanlage während eines normalen Schultages ist **Abbildung 5.1** dargestellt. Der Tagesgang der bei maximalem Brennstoffeinschub erzielbaren Feuerungswärmeleistung ist hierbei in % zusammen mit dem Restsauerstoffgehalt im Abgas und den Probenahmezeiten für die Planfilter- und Impaktormessungen aufgetragen. Die Beprobungszeiten und die gemessenen Partikelkonzentrationen sind als Rechtecke dargestellt.

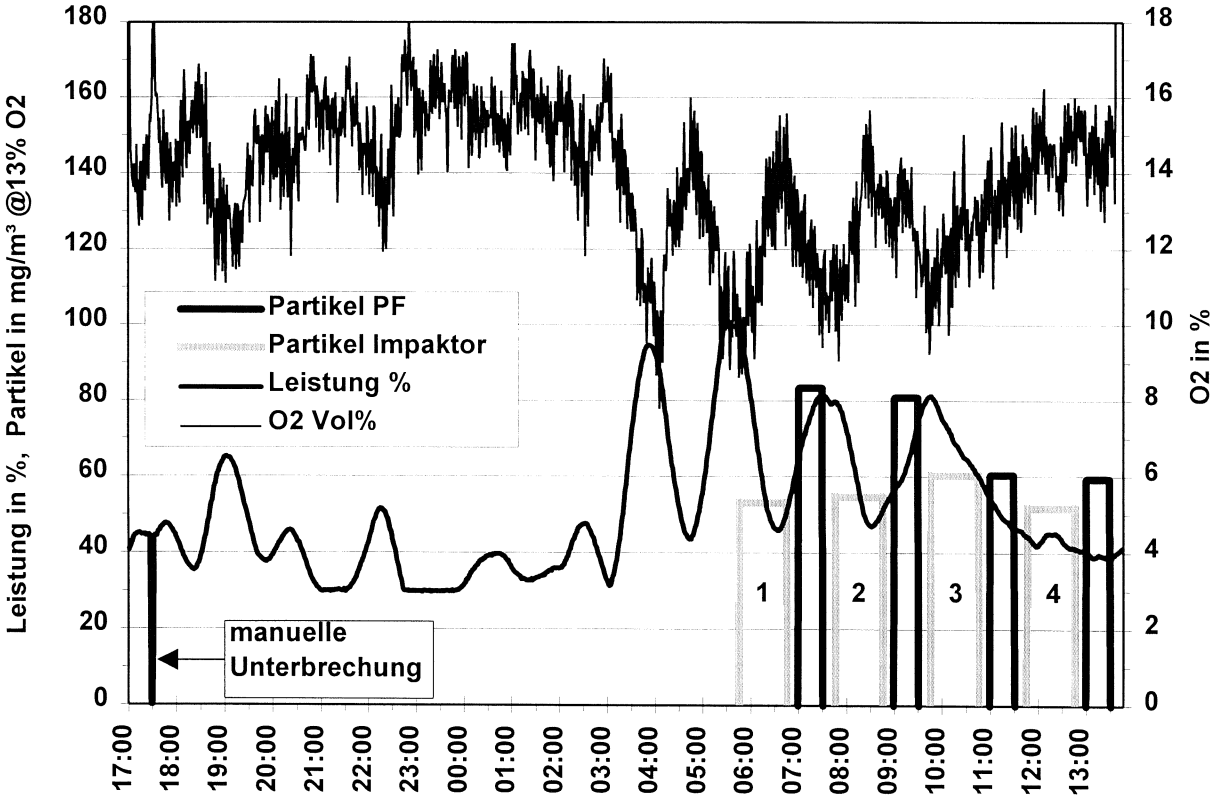


Abbildung 5.1: Betriebsverhalten der Vorschubrostfeuerung 450 kW anhand des O_2-Konzentrationsverlauf, der Abgastemperatur und der prozentualen Leistung mit Probenahmezeiten der Impaktor- und Planfiltermessungen

Die abgegebene Feuerungswärmeleistung der Anlage konnte nicht beeinflusst werden. Die Probenahmen für die Impaktor- und Planfiltermessungen konnten an dieser Anlage nicht zeitgleich erfolgen, da das vorhandene Abgasrohr nur den Einbau einer Probenahmesonde zuließ. Die Probenahmen erfolgten in einem für die Emissionen repräsentativen Zeitraum zwischen 05:30 Uhr und 13:30 Uhr. Die Planfilter- und Impaktorproben wurden anhand der prozentualen Wärmeleistung der Anlage im Probenahmezeitraum den Lastzuständen *hoch* bzw. *niedrig* zugeordnet.

Wie aus Abbildung 5.1 hervorgeht, befand sich die Feuerungsanlage während der beiden ersten Planfiltermessungen in einer Phase der Leistungserhöhung, wo Luft- und Brennstoffmenge erhöht wird. In diesem Betriebszustand wurden höhere Partikelkonzentrationen gemessen, als mit den Planfiltern 3 und 4 mit verminderter Anlagenleistung. Aus diesem Umstand ist auch die relativ große Differenz zwischen der Gesamtpartikelmasse der ersten beiden Planfiltersubstrate und den Impaktorstufen (einschließlich Endfilter) zu erklären.

In **Tabelle 5.1** sind die Mittelwerte der gemessenen Konzentrationen und Temperaturen während der vier Partikelmessungen dargestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die Messwerte auf 13 Vol.% Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas bezogen. Die Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas lagen im Messzeitraum auf sehr niedrigem Niveau im Bereich der Nachweisgrenze des verwendeten Messgerätes (< 5 mgC/m^3) und wurden deshalb nicht in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 5.1: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Vorschubrostfeuerung 450 kW bei der Probenahme mit dem Planfilterkopfgerät bei den Lastzuständen ***hoch*** und ***niedrig***

Planfiltermessungen im Lastzustand	Brennstoff-nummer	Leistung in %	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2	NO_x	Partikel *
Planfilter 1	NB21	75	164	11,80	257	303	83
Planfilter 2	NB21	63	151	13,06	365	288	81
hoch (Mittelwert)	NB21	**69**	**158**	**12,43**	**311**	**296**	**82**
Planfilter 3	NB21	50	151	13,54	310	301	60
Planfilter 4	NB21	39	135	14,41	415	299	59
niedrig (Mittelwert)	NB21	**46**	**143**	**13,98**	**363**	**300**	**60**
Gesamtmittelwert	NB21	*57*	*150*	*13,20*	*334*	*298*	*71*

T-Mess = Temperatur an der Messstelle
* mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte Partikelkonzentration
Leistung in % der maximal erzielbaren Leistung bei 100 % Brennstoffeinschub (450 kW)

Analog zu Tabelle 5.1 sind in **Tabelle 5.2** die Mittelwerte der gemessenen Konzentrationen und Temperaturen während der vier Impaktormessungen dargestellt. Der aus allen Impaktormessungen berechnete Gesamtmittelwert für die Partikelkonzentration fällt um rund 23 % niedriger aus als die mit dem Planfilterkopfgerät gemessene Gesamtpartikel-Konzentration.

Tabelle 5.2: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Vorschubrostfeuerung 450 kW bei der Partikelprobenahme mit dem Impaktor bei den Lastzuständen ***hoch*** und ***niedrig***

Impaktormessungen im Lastzustand	Brennstoff-nummer	Leistung in %	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2	NO_x	Partikel *
Impaktor 1	NB21	65	167	12,01	219	290	53
Impaktor 2	NB21	60	161	12,64	277	298	55
Impaktor 3	NB21	70	171	12,03	249	314	60
hoch (Mittelwert)		***65***	***166***	***12,23***	***248***	***301***	***56***
Impaktor 4	NB21	43	137	14,50	428	293	52
niedrig (Mittelwert)		***43***	***137***	***14,50***	***428***	***293***	***52***
Gesamtmittelwert		*60*	*159*	*12,80*	*293*	*299*	*55*

T-Mess = Temperatur an der Messstelle
* mit den Impaktorergebnissen berechnete Partikelkonzentration
Leistung in % der maximal erzielbaren Leistung bei 100 % Brennstoffeinschub (450 kW)

Diese Abweichung liegt in einem praxisüblichen Rahmen, wobei zwei Effekte eine Rolle spielen. Zum einen sind dies verfahrensbedingte Minderbefunde bei der Probenahme mit Kaskadenimpaktoren (VDI 2066) und zum anderen lagen die Impaktormessungen bevorzugt bei Betriebszuständen mit reduzierter bzw. abnehmender Anlagenleistung. Die Ergebnisse der vier Impaktormessungen zeigen eine gut vergleichbare Partikel-Größenverteilung auf, welche in **Abbildung 5.2** dargestellt ist.

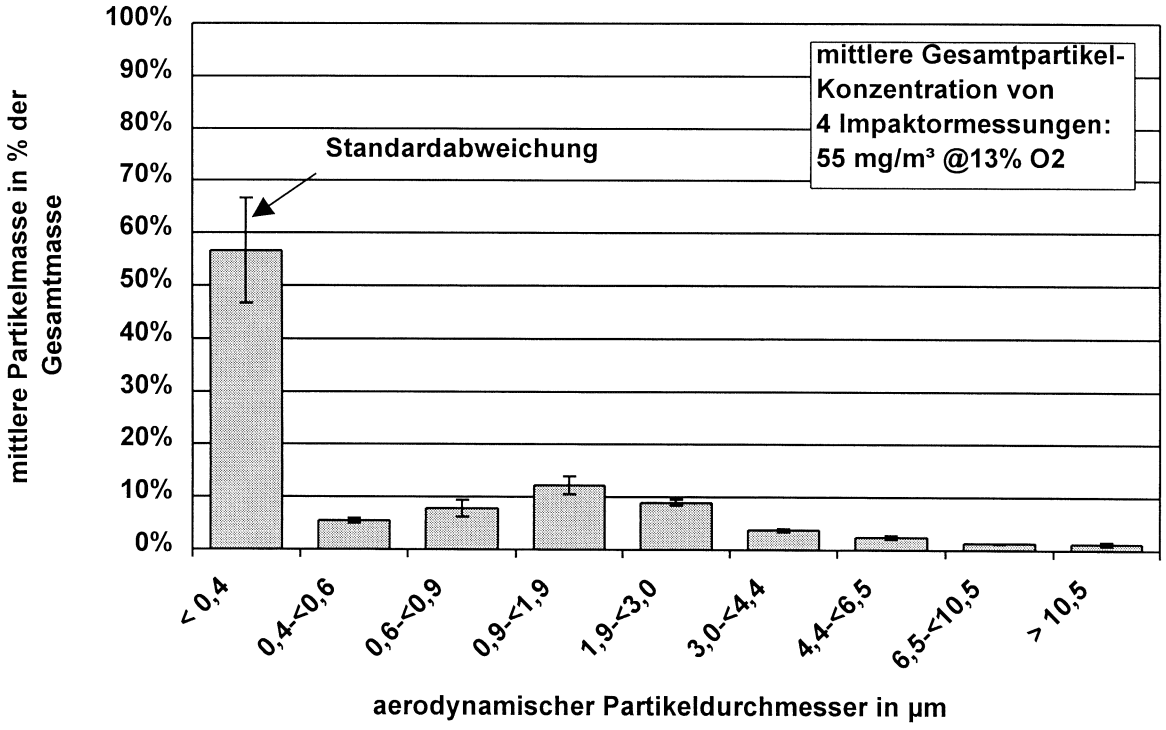


Abbildung 5.2: Mittlere Partikel-Größenverteilung in % der Gesamtpartikelmasse und Standardabweichung aus vier Impaktormessungen im Abgas der Vorschubrostfeuerung 450 kW nach dem Zyklonabscheider (Praxisanlage, Brennstoff: naturbelassene Hackschnitzel)

Auswirkungen der Betriebszustände *hohe* und *niedrige* Anlagenleistung auf die Partikelgrößenverteilung ließen sich nicht feststellen, was aus den kleinen Standardabweichungen der einzelnen Korngrößenfraktionen deutlich wird.

In **Tabelle 5.3** sind die mittleren Anteile der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei der Vorschubrostfeuerung 450 kW angegeben.

Tabelle 5.3: Mittlere Partikelklassen PM_1, $PM_{2.5}$ und PM_{10} im Abgas der Vorschubrostfeuerung 450 kW nach dem Zyklonabscheider (4 Impaktoren, Praxisanlage)

Brennstoff	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
naturbelassene Hackschnitzel	70,0 %	91,2 %	98,8 %	55 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

5.2 Praxisanlage Unterschubfeuerung 430 kW (ältere Anlage)

Diese Messungen dienen der Beschreibung des "Ist-Zustandes" an einer repräsentativen und älteren Praxisanlage. Die Feuerungsanlage dient zur Beheizung der Produktionsgebäude eines Fensterbaubetriebes und wird mit naturbelassenen Holzspänen aus der Maschinenabsaugung betrieben. Zusätzlich ist ein Hacker für Stückholz vorhanden. Die Anlage sowie der dort eingesetzte Brennstoff sind in **Kapitel 3.3 bzw. 3.7** beschrieben. Die Messungen erfolgten an einem normalen Arbeitstag im Februar 2000 mit Außentemperaturen zwischen 2 und 11 °C.

Wie bei Anlagen älteren Baujahres durchaus üblich, verfügte die Feuerung nicht über eine modulierende Leistungsregelung. Der Teillastbetrieb wird bei diesen Anlagen durch einen periodischen Wechsel der Betriebszustände "Brennen" und "Gluthaltung" realisiert, eine intermittierende Betriebsweise, wie sie in **Abbildung 5.3** anhand der CO- und O_2-Konzentrationsverläufe dargestellt ist.

Im Betriebszustand "Brennen" sind die Verbrennungsluftgebläse sowie der Saugzugventilator eingeschaltet. Die Brennstoffzufuhr erfolgt in kurzen, fest eingestellten Takten über die Einschubschnecke. Im Betriebszustand "Gluthaltung" sind alle Gebläse abgeschaltet. Die Feuerung wird mit Naturzug betrieben. Eine minimale Brennstoffmenge wird mit fest eingestellter Taktzeit dem Glutbett zugeführt. Die Identifizierung der Betriebszustände erfolgte anhand der Schaltzustände des Saugzugventilators. Da die Feuerung im Praxisbetrieb ständig in kurzen Zeitabständen zwischen den Betriebszuständen hin und her schaltete war es nicht möglich, die Probenahmezeiten für die Impaktor- und Planfiltermessungen so zu legen, dass zwischen Zuständen *hoher* und *niedriger* Leistung differenziert werden konnte. Zur Bestimmung der mittleren Partikelkonzentration und der Partikel-Größenverteilung während des Praxisbetriebes wurden vier Impaktor- und Planfiltermessungen jeweils parallel eine Stunde im unverdünnten Abgas vorgenommen. Die Konzentrationen und Beprobungszeiten sind in Abbildung 5.3 als Rechtecke dargestellt.

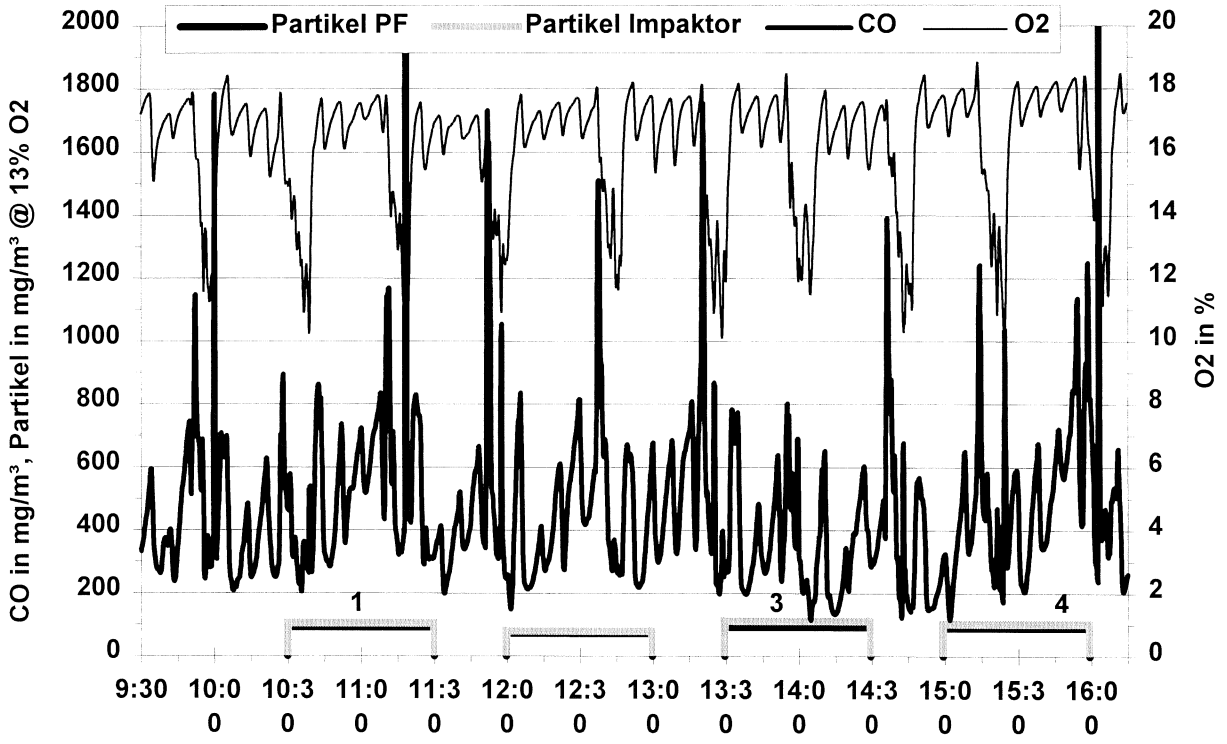


Abbildung 5.3: Betriebsverhalten der Unterschubfeuerung 430 kW bei diskontinuierlichem Teillastbetrieb anhand der CO-, und O_2-Konzentrationsverläufe mit Probenahmezeiten der Impaktor- und Planfiltermessungen

In **Tabelle 5.4** sind die Messergebnisse für verschiedene Zeiträume und Betriebszustände zusammengestellt. Die dargestellten Messwerte wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas bezogen.

Tabelle 5.4: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Unterschubfeuerung 430 kW während der den Impaktor- und Planfilterprobenahmen (Probenahmedauer jeweils 1h) sowie bei verschiedenen anderen Betriebszuständen ohne Partikelmessung

Betriebszustand und Partikelprobenahme	Brennstoffnummer	T-Mess	Leistung *	O_2	CO	NO_x	Partikelkonz.	
							Impaktor	Planfilter
		in °C	in kW	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
Brennen	NB22	171	203	14,67	878	117		
Gluthalten	NB22	91	64	17,10	1071	77		
PF & Impaktor 1	NB22	134	141	15,66	1094	102	104	92
PF & Impaktor 2	NB22	120	108	16,43	1005	96	78	73
PF & Impaktor 3	NB22	126	113	16,26	774	104	111	93
PF & Impaktor 4	NB22	113	99	16,77	1171	92	102	89
Gesamtmittelwert	NB22	*121*	*116*	*16,19*	*976*	*96*	*99*	*87*

T-Mess = Temperatur an der Messstelle PF = Planfilter

* Die Leistung wurde anhand der gemessenen Abgasgeschwindigkeit, Abgastemperatur und Brennstoffzusammensetzung über die Verbrennungsrechnung ermittelt

Die mittlere Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas lagen bei allen vier Probenahmezeiträumen unter 10 mgC/m³ (bezogen auf 13 Vol.% O_2), weshalb diese nicht in der Tabelle aufgeführt sind. Die mit dem Impaktor sowie mit dem Planfilterkopfgerät bestimmten Partikelkonzentrationen weisen bei dieser Anlage nur geringe Unterschiede auf.

Die mittlere Partikelgrößenverteilung der vier Impaktormessungen ist in **Abbildung 5.4** zusammen mit den Standardabweichungen dargestellt. Mit Ausnahme der groben Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von > 10 µm sind die Partikel-Größenverteilungen sehr ähnlich, was an den kleinen Standardabweichungen deutlich wird.

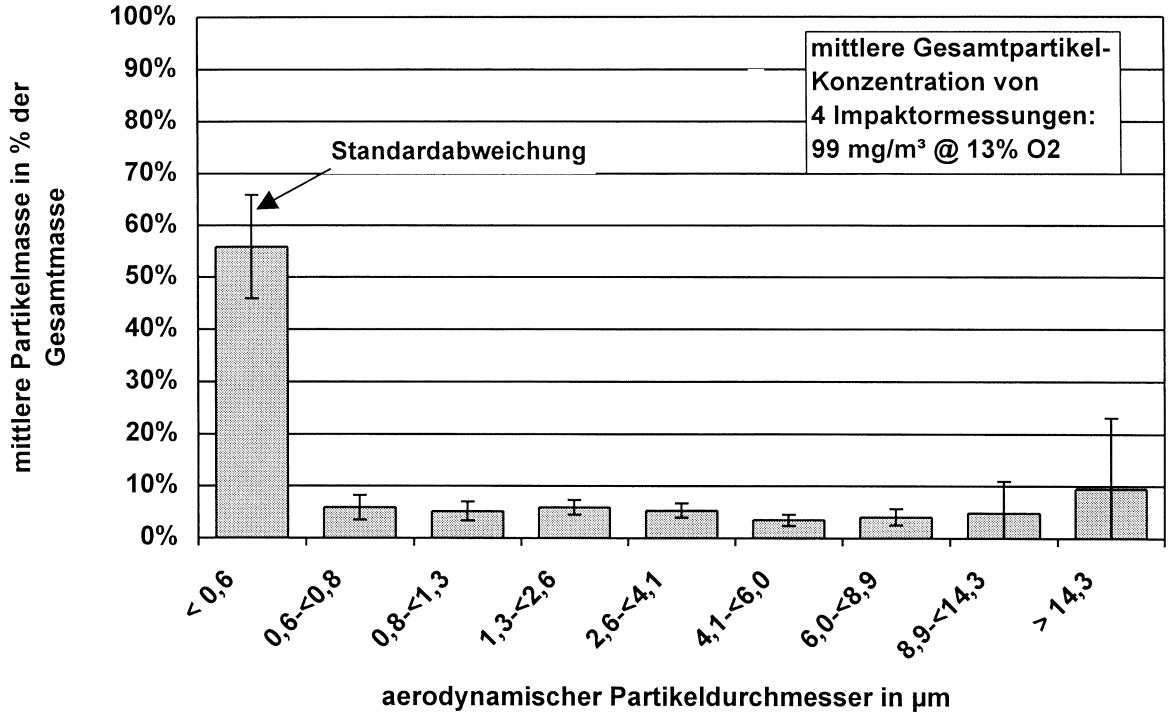


Abbildung 5.4: Mittlere Partikel-Größenverteilung und Standardabweichung aus vier Impaktormessungen im Abgas der Unterschubfeuerung 430 kW (Praxisanlage, Brennstoff: naturbelassene Späne aus der Maschinenabsaugung, Fensterbau)

In **Tabelle 5.5** sind die mittleren Anteile der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei der Unterschubfeuerung 430 kW angegeben.

Tabelle 5.5: Mittlere Partikelklassen PM_1, $PM_{2.5}$ und PM_{10} im Abgas der Unterschubfeuerung 430 kW (4 Impaktoren, Praxisanlage)

Brennstoff	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
naturbelassene Späne (Fensterbau)	64,4 %	72,9 %	86,8 %	99 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

5.3 Versuchsanlage - Einfluss des Luftüberschusses

Bei der kontinuierlichen Verbrennung in mechanisch beschickten Anlagen kann bei Verwendung eines trockenen Brennstoffes der Luftüberschuss in einem relativ weiten Bereich variiert werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sollten bei allen Partikelmessungen gute Ausbrandbedingungen vorliegen, so dass keine organischen Produkte aus unvollständiger Verbrennung wesentlich zur Partikelmasse beitragen. Durch diese Forderung wurde die Variationsbreite des Luftüberschusses begrenzt. Bei zu geringem Luftüberschuss kommt es aufgrund von lokalem Luftmangel und schlechten Mischungsverhältnissen zur unvollständigen Verbrennung. Bei hohem Luftüberschuss wird der Feuerraum so stark ausgekühlt, dass die Temperatur für eine vollständige Verbrennung nicht mehr ausreicht.

Zur Untersuchung des Einflusses vom Luftüberschuss auf die Partikelemissionen wurden je zwei Impaktormessungen bei hohem, mittlerem und niedrigem Luftüberschuss jeweils eine Stunde im unverdünnten Abgas beladen. Parallel hierzu erfolgte die Bestimmung der Gesamt-Partikelmasse mittels Planfilterkopfgerät.

In **Abbildung 5.5** ist das Verbrennungsverhalten der 150 kW Versuchsanlage anhand der charakteristischen Konzentrationsverläufe von CO, O_2 und der abgegeben Leistung während des Versuchszeitraums dargestellt. Die Probenahmezeiträume der Impaktor- und zeitgleichen Planfiltermessungen sind dabei als Rechtecke dargestellt. Die Höhe der Rechtecke entspricht der mittleren Gesamt-Partikelkonzentration im Probenahmezeitraum.

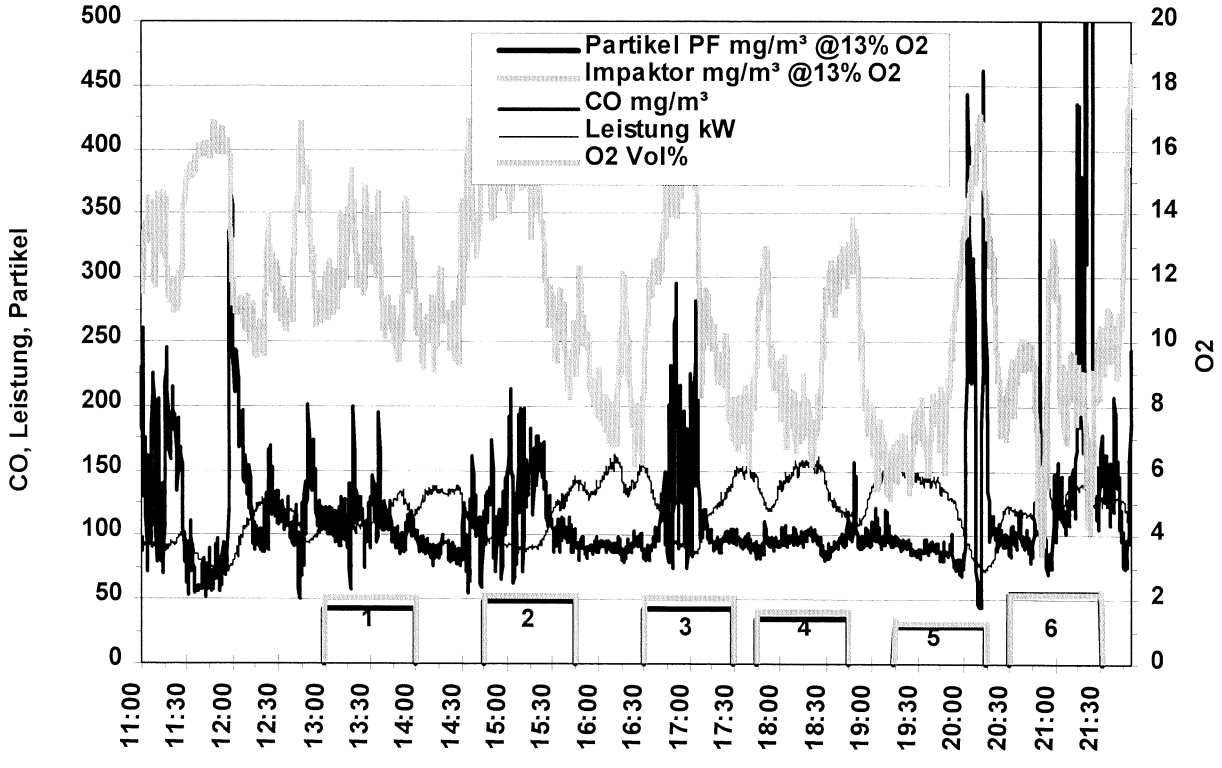


Abbildung 5.5: Charakteristisches Verbrennungsverhalten der 150 kW Versuchsanlage und mittlere Partikelkonzentrationen bei der Variation des Luftüberschusses (Brennstoff: beschichtete Spanplatten; PF: Planfilter)

In **Tabelle 5.6** sind die Mittelwerte der gemessenen Konzentrationen und Temperaturen während der 6 Partikel-Probenahmen dargestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die Messwerte auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas bezogen.

Tabelle 5.6: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der 150 kW Versuchsanlage während der Partikelprobenahmen bei Variation des Luftüberschusses (Probenahmedauer je 1h)

Luftüber-schuss	Brennstoff-nummer	T-Mess	Leistung	O_2	CO	NO_x	Partikelkonz.	
							Impaktor	Planfilter
		in °C	in kW	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
1 hoch	SP18	135	116	12.13	100	362	52	43
2 hoch	SP18	130	104	13.32	128	420	54	48
3 mittel	SP18	129	113	12.13	111	456	51	43
4 mittel	SP18	139	139	9.60	67	560	42	35
5 niedrig	SP18	123	126	9.73	83	561	32	29
6 niedrig	SP18	128	129	8.47	141	638	55	55

T-Mess = Temperatur an der Messstelle

Aus der Betrachtung der Konzentrationsverläufe in Abbildung 5.5 wird deutlich, dass es auch mit der Versuchsanlage nicht immer gelang, über den ganzen Probenahmezeitraum einer Partikelmessung den gewünschten Sauerstoffgehalt einzustellen und diesen auch noch möglichst konstant zu halten; immer unter der Voraussetzung gute Verbrennungsbedingungen (möglichst niedrige CO Konzentrationen) zu erzielen. Im letzten Probenahmezeitraum kam es bereits kurzzeitig zu Luftmangelsituationen, was sowohl an den CO-Spitzen als auch am erhöhten CO Mittelwert in Tabelle 5.6 zu erkennen ist.

Abgesehen vom letzten Probenahmezeitraum weisen aber die bezogenen Mittelwerten der Partikelkonzentrationen eine deutliche Abhängigkeit von Luftüberschuss auf. Diese ist in **Abbildung 5.6** dargestellt.

Wie aus Abbildung 5.6 hervorgeht, gibt es bezüglich des Luftüberschusses einen optimalen Betriebspunkt mit minimalen Partikelkonzentrationen, wie es z.B. beim Kohlenmonoxid als sogenannte CO-λ-Charakteristik bekannt ist (NUSSBAUMER & GOOD 1995).

Der Einfluss des Luftüberschusses auf die Partikel-Größenverteilungen zeigt **Abbildung 5.7**. Das linke Balkendiagramm zeigt die Situation bei ausreichend hohem Luftüberschuss, dargestellt als mittlere Partikel-Größenverteilung der Impaktormessungen 1-5 (s.a. Tabelle 5.6) die einheitliche Verteilungen aufwiesen, was aus den kleinen Standardabweichungen hervorgeht. Bei weiterer Verringerung des Luftüberschusses kommt es zu einem Anstieg der Gesamtpartikel-Konzentration und einer Änderung der Partikel-Größenverteilung, wie es im rechten Teil der Abbildung dargestellt ist.

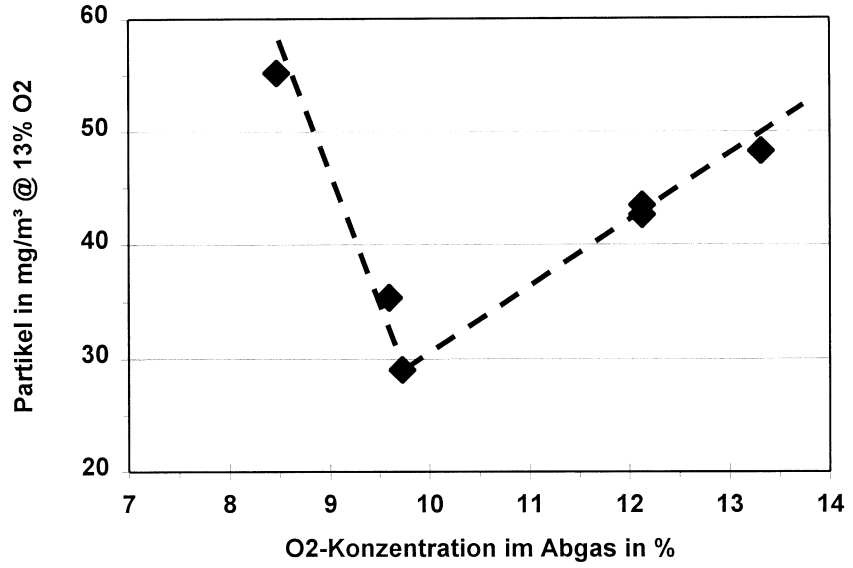


Abbildung 5.6: Einfluss des Luftüberschusses auf die Partikelkonzentration im Abgas anhand der Planfiltermessungen unter vergleichbar guten Ausbrandbedingungen (Versuchsanlage 150 kW)

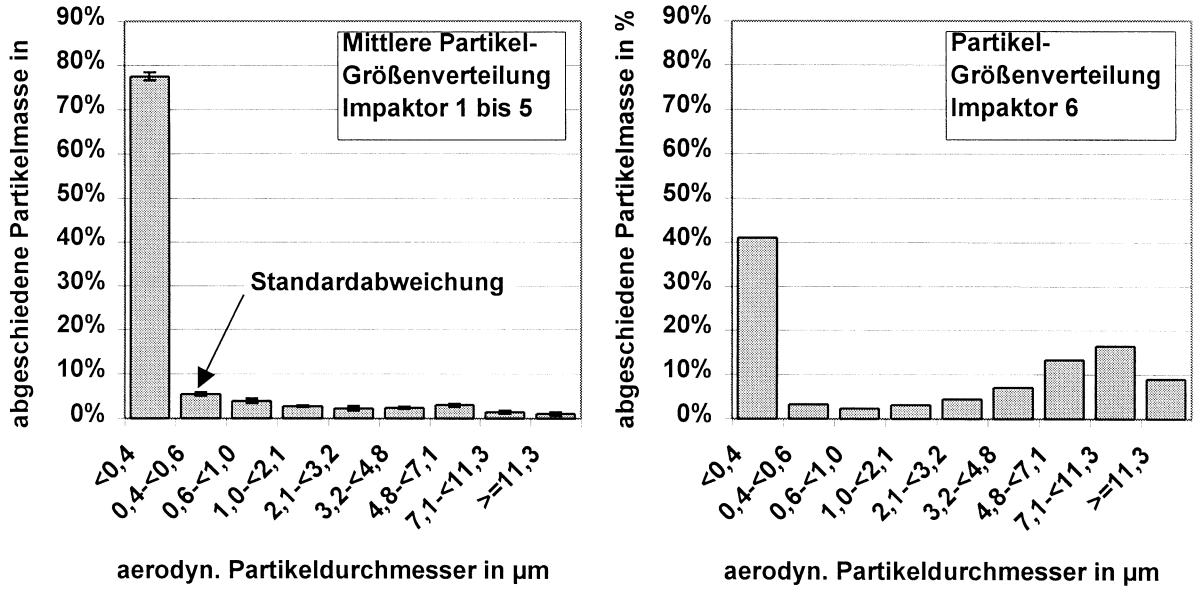


Abbildung 5.7: Änderung der Partikel-Größenverteilungen bei Verringerung des Luftüberschusses an der Versuchsanlage 150 kW; links: ausreichend hoher Luftüberschuss, rechts: niedriger Luftüberschuss

In **Tabelle 5.7** sind die mittleren Anteile der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei der Versuchsanlage 150 kW angegeben.

Tabelle 5.7: Mittlere Partikelklassen PM_1, $PM_{2.5}$ und PM_{10} im Abgas der 150 kW Versuchsanlage (Impaktor 1-5)

Brennstoff	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
beschichtete Spanplatten	87,1 %	90,2 %	98,8 %	46 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

5.4 Versuchsanlage - Einfluss der Feuerungsleistung und Auswirkung der Abgasreinigung mittels Gewebefilter

Für diese Versuche wurde die Versuchsanlage 150 kW wieder mit zerkleinerten beschichteten Spanplatten betrieben, wobei diesmal ein Teil der Primärluft durch rückgeführtes Abgas ersetzt wurde, so dass gleichzeitig auch die Auswirkungen dieser Maßnahme auf die Partikelemissionen untersucht werden konnten. Im letzten Drittel des Versuches wurde das Abgas über einen Gewebefilter geleitet und Partikelmessungen im Rohgas (vor dem Filter) und im Reingas (nach dem Filter) durchgeführt.

Das Verbrennungsverhalten der Versuchsanlage bei diesen Abbrandversuchen ist anhand der charakteristischen Konzentrationsverläufe in **Abbildung 5.8** dargestellt. Die Probenahmezeiträume und die mittleren Partikelkonzentrationen der Impaktor- und Planfiltermessungen sind als Rechtecke gekennzeichnet.

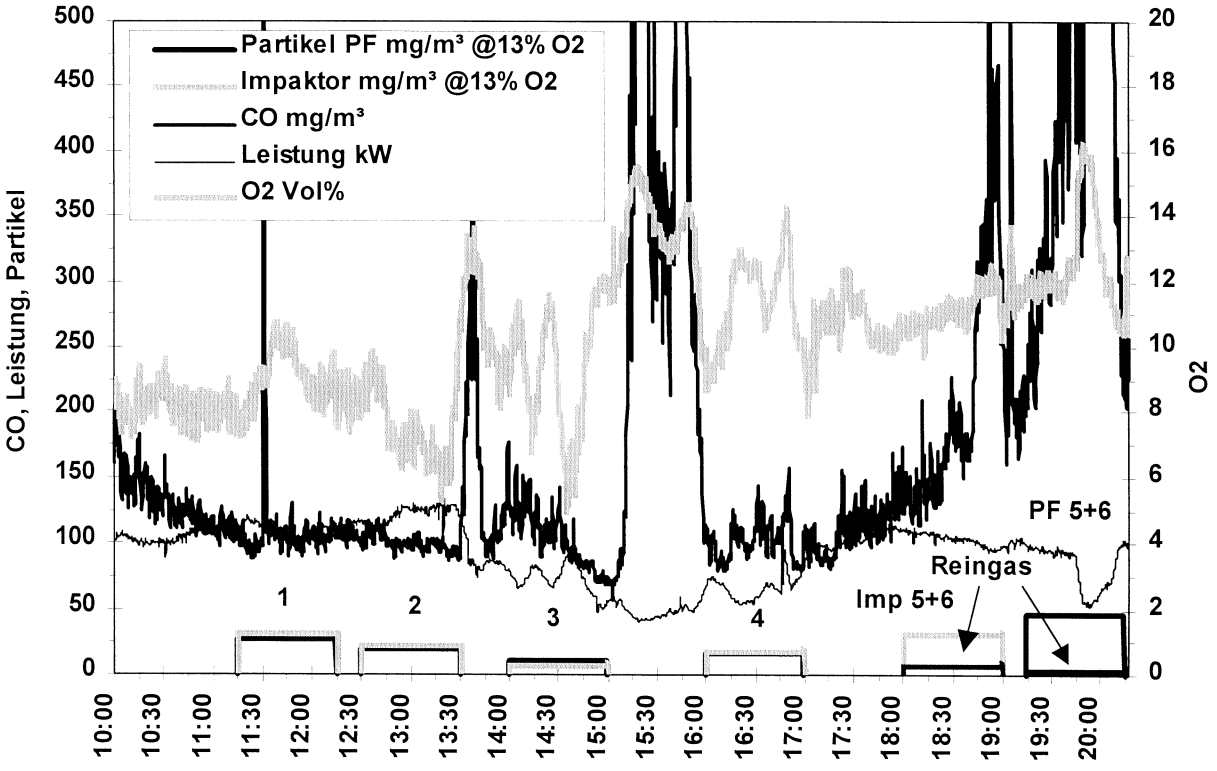


Abbildung 5.8: Charakteristisches Verbrennungsverhalten der Versuchsanlage 150 kW und mittlere Partikelkonzentrationen bei hoher und niedriger Feuerungsleistung und beim Einsatz eines Gewebefilters (Betrieb mit Abgasrückführung, Brennstoff: beschichtete Spanplatten)

Im oberen Teil der **Tabelle 5.8** sind die Mittelwerte der Konzentrationen und Temperaturen während der vier Partikel-Probenahmen bei unterschiedlicher Feuerungswärmeleistung und im unteren Teil sind die Werte während der Messungen am Gewebefilter dargestellt.

Tabelle 5.8: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Versuchsanlage 150 kW während der Partikelprobenahmen bei Variation der Feuerungsleistung (parallele Impaktor- und Planfilterprobenahme) und am Gewebefilter (Probenahmedauer jeweils 1h)

Feuerungsleistung	Brenn-stoff-nummer	T-Mess	Leistung	O_2	CO	NO_x	Partikelkonz.	
							Impak.	Planfilt.
		in °C	in kW	in Vol.%	in mg/m³ bei 13 Vol.% O_2			
1 hoch	SP18	119	108	9,08	86	616	32	27
2 hoch	SP18	122	122	7,49	59	739	22	19
hoch (Mittelwert)		***121***	***115***	***8,3***	***73***	***678***	***27***	***23***
3 mittel	SP18	88	72	9,30	71	589	8	10
4 mittel	SP18	88	67	11,42	85	625	18	19
mittel (Mittelwert)		***88***	***70***	***10,4***	***78***	***607***	***13***	***15***
Messung im Roh- und Reingas am Gewebefilter (Impaktoren und Planfilter zeitversetzt)								
5 Imp Rohgas	SP18	120	104	11,13	171	660	31	
6 Imp Reingas							7	
5 PF Rohgas	SP18	109	83	12,58	588	564		47
6 PF Reingas								3

Imp = Impaktormessung; PF = Planfiltermessung; T-Mess = Temperatur an der Messstelle

Aus den angegebenen Partikel-Konzentrationen wird deutlich, dass diese im Teillastbetrieb abnehmen. Solche Zusammenhänge wurden bereits bei früheren Untersuchungen (s.a. Kapitel 4) ermittelt und auch von anderen Autoren beobachtet (HASLER & NUSSBAUMER 1997). Mögliche Ursachen hierfür sind längere Verweilzeiten im Feuerraum, kleinere Strömungsgeschwindigkeiten und niedrigere Temperaturen im Bereich der Brennstoffschüttung, also insgesamt eine geringere Feuerraumbelastung. Diese Aussage ist allerdings nur dann zutreffend, wenn die Feuerung auch bei Teillast kontinuierlich betrieben werden kann und gute Ausbrandbedingungen vorliegen. Kommt es im Teillastbetrieb zur unvollständigen Verbrennung, z.B. durch Auskühlung des Feuerraumes, führt dies wieder zu höheren Partikelkonzentrationen im Abgas.

Aus einem Vergleich der Partikel-Konzentrationen in Tabelle 5.8 beim Betrieb der Feuerung mit Abgasrückführung mit den Werten aus Tabelle 5.6 ohne Abgasrückführung geht deutlich hervor, dass durch diese Maßnahme die Partikel-Konzentrationen erheblich gesenkt werden können. Eine Erklärung dieses Verhaltens könnte darin bestehen, dass durch die Abgasrückführung die Temperatur in der Brennstoffschüttung abnimmt (SALZMANN et al. 1998) und dadurch auch die Verdampfung mineralischer Brennstoffbestandteile vermindert wird. Diese Vorgänge sind bislang nur unzureichend erforscht und hinsichtlich möglicher Minderungspotentiale entsprechend vorsichtig zu bewerten. Wichtig für den Minderungseffekt ist hierbei, dass ein Teil der Primärluft substituiert wird und die Gasmenge durch die Brennstoffschüttung durch die Abgasrückführung nicht sonderlich erhöht wird. Denn dies könnte dort zu ei-

nem erhöhten Partikelaustrag führen. Um diesen Effekt zu vermeiden, kann die Zuführung des rückgeführten Gases auch unmittelbar oberhalb des Brennstoffbetts erfolgen, wie es z.B. an einer Rostfeuerung größerer Leistung (3,8 MW) realisiert wurde (PETERS 2000).

Die Auswirkungen des kontinuierlichen Teillastbetriebes sind anhand der mittleren Partikel-Größenverteilung, die aus den Ergebnissen von jeweils zwei Impaktormessungen berechnet wurden, bei Voll– und Teillast in **Abbildung 5.9** dargestellt. Solange im kontinuierlichen Teillastbetrieb vergleichbar gute Verbrennungsbedingungen wie im Vollastbetrieb erzielt werden, ist kein wesentlicher Unterschied in der Partikel-Größenverteilung festzustellen, was auch durch die Messungen an der Praxisanlage bestätigt werden konnte (s.a. Abbildung 4.4).

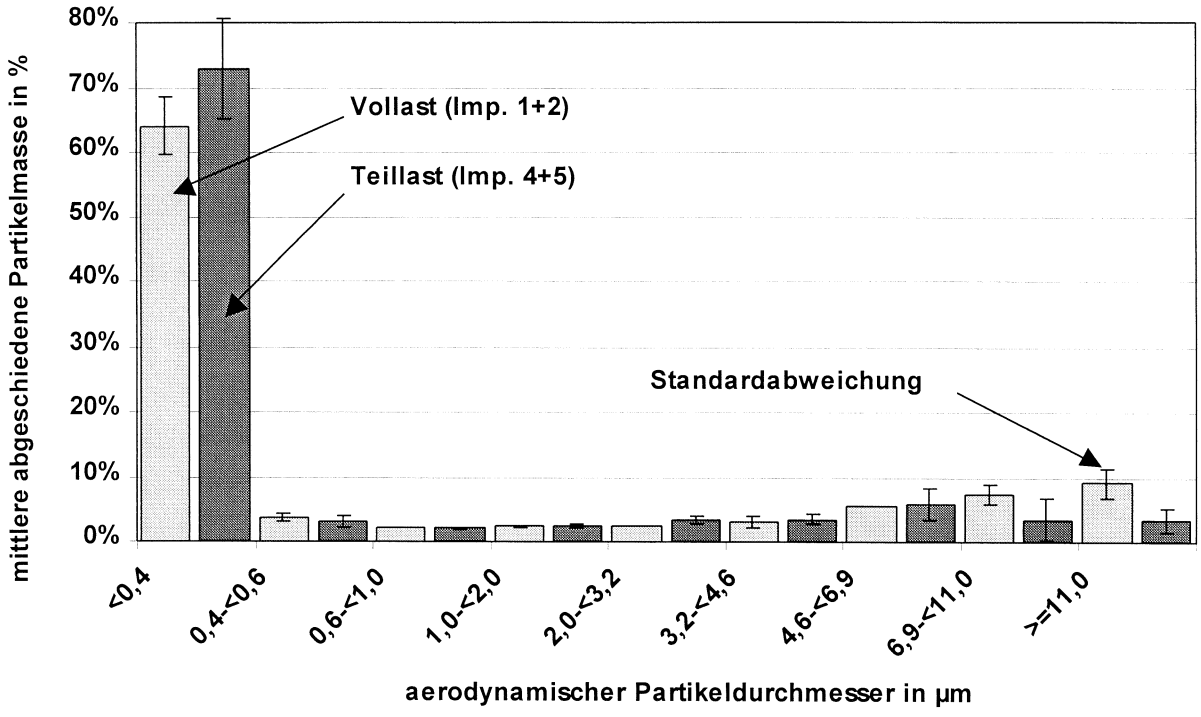


Abbildung 5.9: Mittlere Partikel-Größenverteilung der Versuchsanlage 150 kW bei Voll- und Teillast im kontinuierlichen Betrieb mit Abgasrückführung (Probenahmedauer jeweils 1 h)

Die Ergebnisse der Planfiltermessungen im Roh- und Reingas vor und nach dem Gewebefilter sind in Tabelle 5.8 in den beiden letzten Zeilen eingetragen. Die Probenahme im Roh- und Reingas erfolgte zeitgleich, weshalb die Angaben zu den Randbedingungen der beiden Messungen identisch sind. Erwartungsgemäß konnten die Partikel-Konzentrationen im Abgas mit dem Gewebefilter signifikant vermindert werden, was bereits schon mehrfach gezeigt werden konnte (ZUBERBÜHLER & BAUMBACH 1997). Das Hauptinteresse dieser Untersuchung galt hier nicht den Gesamtpartikel-Konzentrationen, sondern vielmehr den Unterschieden in der Partikel-Größenverteilung, wie diese im folgenden beschrieben werden.

Abbildung 5.10 zeigt die Partikel-Größenverteilungen anhand der auf den einzelnen Impaktorstufen abgeschiedenen Partikelmassen im Roh- und Reingas am Gewebefilter.

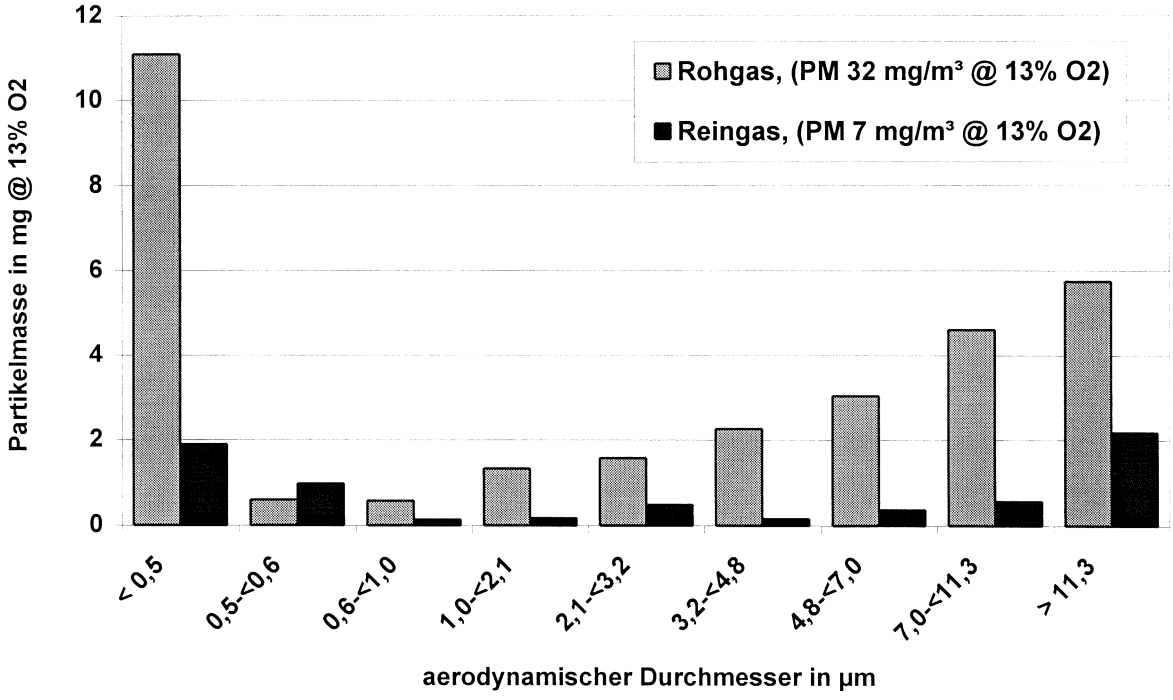


Abbildung 5.10: Verteilung der Partikelmasse über dem aerodynamischen Durchmesser im Roh- und Reingas am Gewebefilter beim Verbrennen von beschichteten Spanplatten bei der Versuchsfeuerung 150 kW mit Abgasrückführung

Die Messung erfolgte zeitgleich an der Versuchsanlage, die mit beschichteten Spanplatten und Abgasrückführung betrieben wurde. Die Partikel im Rohgas weisen die typische Verteilung auf, wie sie mit dieser Feuerung beim Betrieb mit Abgasrückführung erzielt wurde. Ein Großteil der Partikelmasse mit einem aerodynamischen Durchmesser < 0,5 µm befindet sich auf dem Endfilter. Bedingt durch die Abgasrückführung finden sich auch relativ hohe Anteile der Partikelmasse auf den Sammelstufen mit größerer Partikeldurchmessern. Nach dem Gewebefilter ist keine Anhäufung der jetzt noch im Reingas enthaltenen Partikelmasse bei bestimmten aerodynamischen Durchmessern zu erkennen. Bei einer sehr niedrigen Gesamtpartikel-Konzentration von 7 mg/m³ kann die Größenverteilung mit dem verwendeten Verfahren und der relativ kurzen Probenahmezeit nur noch bedingt aufgelöst werden, da die auf den einzelnen Sammelstufen abgeschiedene Partikelmasse sehr klein und somit die möglichen Fehler, z.B. durch Masseverluste beim Handling der Sammelplatten, groß sind. Eine Betrachtung der Feinstpartikel (PM_1) in Abbildung 5.10 zeigt deutlich, dass der Einsatz eines Gewebefilters die Möglichkeit eröffnet, auch diese Fraktion wirkungsvoll aus dem Abgas abzuscheiden.

In **Tabelle 5.9** sind die mittleren Anteile der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} bei der Versuchsfeuerung 150 kW angegeben.

Tabelle 5.9: Mittlere Partikelklassen PM_1, $PM_{2.5}$ und PM_{10} im Abgas der 150 kW Versuchsanlage beim Betrieb mit Abgasrückführung mit hoher und mittlerer Feuerungswärmeleistung (Mittelwert aus je 2 Impaktoren, Brennstoff: beschichtete Spanplatten)

Feuerungswärmeleistung (FWL)	Anteile der Partikelklassen			Gesamtpartikelmasse (Impaktorwerte)
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
hohe FWL	70,1 %	73,7 %	90,6 %	22 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)
mittlere FWL	78,0 %	82,2 %	96,5 %	13 mg/m³ (bei 13 Vol.% O_2)

6 Zusammengefasste Ergebnisse

Im Bereich Kleinverbraucher werden meist mechanisch beschickte Feuerungen im Leistungsbereich von 50 – 1.000 kW eingesetzt. Je nach Einsatzort und Nennwärmeleistung können in diesen Feuerungen neben naturbelassenen Hölzern auch andere Brennstoffe, z.B. Holzwerkstoffe wie sie in der 1. BImSchV genannt sind, eingesetzt werden. In der Regel werden diese Feuerungen kontinuierlich betrieben, wodurch ein vollständiger Ausbrand der gasförmigen Bestandteile erreicht wird. D.h. das Abgas enthält praktisch keine Kohlenwasserstoffe. Deshalb konnte hier die Messung der Partikel-Größenverteilung direkt im unverdünnten Abgas erfolgen.

Gegenstand der Untersuchungen war die Ermittlung der Konzentration und Größenverteilung von Partikeln im Abgas sowie deren Einflussfaktoren. Basierend auf bereits vorhandenen Untersuchungen aus früheren Projekten erfolgten Messungen an zwei repräsentativen Praxisanlagen zur Abschätzung der Emissionen unter realen Betriebsbedingungen. An einer eigenen Versuchsanlage wurden Feuerungsparameter, wie Luftüberschuss und Feuerungsleistung, gezielt variiert und die Partikel-Größenverteilung vor und nach einem Gewebefilter bestimmt.

Als übergeordnetes Ergebnis ist festzuhalten, dass die Partikel-Größenverteilungen im Abgas nur unwesentlich von verschiedenen Brennstoffen, dem Lastzustand und dem Luftüberschuss bei der Verbrennung beeinflusst werden. Im Mittel sind 70 % der emittierten Partikelmasse kleiner als 1 µm. Tendenziell kommt es bei unvollständiger Verbrennung (erkennbar an hohen CO-Konzentrationen) zu einer Verschiebung der Partikel-Größenverteilung hin zu größeren aerodynamischen Partikeldurchmessern.

Wesentlich größer sind die Einflüsse von Feuerungsparametern auf die emittierte Gesamtpartikelmasse. Hier war eine deutliche Abhängigkeit der Partikel-Konzentration vom eingesetzten Brennstoff und vom Luftüberschuss bei der Verbrennung erkennbar. So nimmt bei zu geringem Luftüberschuss aufgrund lokaler Luftmangelsituationen und bei zu hohem Luftüberschuss aufgrund abnehmender Reaktionstemperaturen, kürzeren Aufenthaltszeiten und durch Austrag von Partikeln aus dem Feuerraum, die Partikelkonzentration im Abgas zu.

Beim Luftüberschuss existiert somit ein optimaler Betriebsbereich mit geringen Partikelemissionen. Solange die Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung im Feuerraum gegeben waren, sich die Feuerung also im optimalen Betriebsbereich befand, wurde sowohl mit einer Reduzierung des Luftüberschusses als auch im kontinuierlichen Teillastbetrieb eine Verminderung der Partikel-Konzentration beobachtet.

Mit dem Gewebefilter konnten Partikel aller Größenfraktionen signifikant vermindert werden, so dass die Partikel-Konzentration nach dem Filter kleiner 10 mg/m³ war. Aufgrund der geringen Partikel-Konzentration nach dem Gewebefilter sind Aussagen über die gemessene Partikelverteilung im Reingas allerdings nur mit Einschränkungen möglich, da die auf den einzelnen Sammelstufen abgeschiedenen Partikelmassen bei den relativ kurzen Probenahmezeiten sehr klein und damit mögliche Messfehler groß sind. In der Tendenz zeigte sich aber, dass vor allem Partikel mit aerodynamischen Durchmessern < 0,5 µm und > 1,0 µm überproportional durch das Gewebefilter reduziert wurden. Somit eröffnet sich die Möglichkeit, die Partikelfraktion PM_1 wirkungsvoll durch den Einsatz von Gewebefiltern zu mindern.

In **Tabelle 6.1** sind die mit dem Impaktor ermittelten Anteile der Partikelfraktionen PM_x nochmals zusammengefasst dargestellt. Die Messergebnisse lassen einen gewissen Einfluss des Brennstoffes oder der Betriebsweise auf die Partikelverteilungen erkennen. So nehmen beim Einsatz von Brennstoffen mit hohem Feinanteil (z.B. Buntstift-Reste) die Anteile der Partikelfraktionen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} ab, es werden vermehrt Partikel mit aerodynamischen Durchmessern > 10 µm emittiert.

Tabelle 6.1: Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} für Anlagen der Kleinverbraucher

Bauart der Feuerung	Brennstoff	Anteile der Partikelklassen in %		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Unterschubfeuerung (175 kW mit Zyklonabscheider)	naturbelassene Hackschnitzel	79,8	85,6	93,8
	Spanplatten beschichtet	79,6	87,6	99,2
Unterschubfeuerung (150 kW mit gestufter Verbrennung und interner Partikelabscheidung)	Schreinerei-Reste	52,7	60,3	75,9
	Buntstift-Reste	39,7	47,1	77,3
	naturbelassenes Holz, Nennlast	67,7	76,3	96,8
	naturbelassenes Holz, Teillast	88,9	96,3	99,6
Vorschubrostfeuerung (450 kW, Neuanlage)	naturbelassene Hackschnitzel, Nennlast	89,3	97,8	99,9
	naturbelassene Hackschnitzel, Teillast	72,3	91,5	100,0
	naturbelassene Hackschnitzel, Nennlast	70,0	91,2	98,8
	naturbelassene Hackschnitzel, Teillast	64,4	72,9	86,8
Vorschubrostfeuerung (430 kW, ältere Anlage)	naturbelassene Hackschnitzel, Teillast	87,1	90,2	98,8
Versuchsanlage (150 kW, moderne Verbrennungstechnik)	Spanplatten beschichtet, Nennlast, üblicher Luftüberschuss	70,1	73,7	90,6
	Spanplatten beschichtet, Teillast, üblicher Luftüberschuss	78,0	82,2	96,5

Im Teillastbetrieb wurde sowohl eine Zunahme (Unterschubfeuerung, 150 kW mit gestufter Verbrennung und interner Partikelabscheidung bei Betrieb mit naturbelassenem Holz) als auch eine Abnahme (Vorschubrostfeuerung, 450 kW) der Partikelfraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ ermittelt. Grundsätzliche Tendenzen (Einflüsse von Brennstoff, Betriebsweise oder Abgasreinigung), die zur Berechnung der Emissionsfaktoren herangezogen werden könnten, lassen sich aber aus den Ergebnissen nicht ableiten.

Deshalb werden zur Berechnung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x Mittelwerte für die Brennstoffqualitäten ‚naturbelassenes Holz' (als Restholz) und ‚Holzwerkstoffe' aus den Ergebnissen der Messungen an den Unterschub- und Vorschubfeuerungen gebildet. Die Werte sind in **Tabelle 6.2** dargestellt und werden in Kapiteln 6 zur Berechnung der Emissionsfaktoren für die Partikelfraktionen PM_x für die Anlagen der Kleinverbraucher (gewerbliche Holzfeuerungen) übernommen.

Tabelle 6.2: Gerundete Mittelwerte der Partikelklassen PM_1, $PM_{2,5}$ und PM_{10} für Anlagen der Kleinverbraucher (gewerbliche Holzfeuerungen)

Bauart der Feuerung	Brennstoff	Anteile der Partikelklassen in %		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Unterschubfeuerung Einblasfeuerungen [1] Vorofenfeuerungen [1]	naturbelassenes Holz	77	88	97
Unterschubfeuerung Einblasfeuerungen [1] Vorofenfeuerungen [1]	Holzwerkstoffe	64	70	88

[1] für diese Feuerungen liegen keine Partikelverteilungen vor. Die Angaben der im selben Feld aufgeführten Feuerungen werden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren herangezogen

7 Literatur

BAUMBACH G., ZUBERBÜHLER U., STRUSCHKA M., STRAUB D., HEIN K.R.G. (1999): Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen, IVD Bericht Nr. 44, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart

BAUMBACH G., ZUBERBÜHLER U., SIEGLE V., HEIN K.R.G. (1997): Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen. Ecomed Verlag, Landsberg

HASLER P., NUSSBAUMER T. (1997): Partikelgrössenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse. Bundesamt für Energiewirtschaft, ENET Bern

MARUTZKY R. (1991): Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten, WKI-Bericht Nr. 26, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig

NOLTING: Firmenprospekt.
Nolting Feuerungstechnik GmbH, Wiebusch Strasse 15, 32760 Detmold

NUSSBAUMER T., GOOD J. (1995): CO/Lamda-Regelung mit Sollwertoptimierung zur Wirkungsgradverbesserung und Schadstoffminderung bei Holzfeuerungen, Holz Zentralblatt Nr.117, Leinfelden-Echterdingen

PETERS F. (2000): Ein Schritt voran: ohne Einblasung und Zündbrenner. Emissionsarme Verfeuerung von Holzbrennstoffen mit hohem Feinanteil auf dem Vorschubrost. Holz-Zentralblatt Nr. 144, S.1982, Leinfelden-Echterdingen

SALZMANN R., GOOD J., NUSSBAUMER T., LEISER O. (1998): Temperature Reduction by Flue Gas Recirculation in Biomass Combustion with Air Staging, Modelling and Experimental Results, Proceedings of the International Conference Biomass for Energy and Industry, Würzburg, 8-11 June 1998, Germany, pp. 1356-1359

SCHMID: Firmenprospekt.
Schmid AG, Postfach 42, CH-8360 Eschlikon

VDI Richtlinie 2066 (1975): Messen von Partikeln. Blatt 1-7, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft Band 4, Beuth-Verlag, Berlin

ZUBERBÜHLER U., BAUMBACH G. (1997): Emissionsarme Verbrennung von problematischen gewerblichen und industriellen Rest- und Abfallhölzern in Pilotanlagen unter 1 MW Feuerungsleistung, IVD-Bericht Nr. 38, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart

8 Anhang

In den folgenden Tabellen sind die gemessenen Emissionskonzentrationen von CO, NOx und Partikeln der entsprechenden Tabellen aus Kapitel 4 und 5 als anlagenspezifische Emissionsfaktoren aufgelistet.

Tabellen aus Kapitel 4:

Tabelle 4.1-Anhang: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 175 kW Unterschubfeuerung (Messdauer jeweils ca. 1h)

Brennstoff	Brennstoff-nummer	Leistung in kW	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel *
					in mg/MJ		
naturbel. Holz	NB8	177	150	8,4	15	79	15 **
Spanpl. beschichtet	SP9	139	140	10,9	19	479	49 **

* mit Planfilterkopfgerät gemessen; ** zeitversetzte Messung; T-Mess = Temp. an Messstelle

Tabelle 4.3-Anhang: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 150 kW Unterschubfeuerung mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum (Messdauer jeweils ca. 1h)

Brennstoff	Brennstoff-nummer	Leistung in kW	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel *
					in mg/MJ		
Schreinerei-Reste	SR1	133	137	8,8	15	271	77 **
Buntstift-Reste	BR17	113	115	7,3	7	84	22 **
naturbel. Holz	NB14	148	141	11,1	18	84	15 **
naturbel. Holz TL	NB14	43	64	8,7	34	43	14 **

** mit Planfilterkopfgerät gemessen; ** zeitversetzte Messung
TL = Teillast; T-Mess = Temperatur Messstelle

Tabelle 4.5-Anhang: Emissionsmittelwerte und Randbedingungen bei den Impaktormessungen an der 450 kW Vorschubrostfeuerung mit Multizyklon-Staubabscheider (Messdauer je ca. 1h)

Last-zustand	Bennstoff-nummer	Leistung in kW	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO	NOx	Partikel *
					in mg/MJ		
90 % Last	NB20	417	182	9,5	34	166	36 **
60 % Last	NB20	273	155	9,9	44	146	35 **

* mit Planfilterkopfgerät gemessen; ** zeitversetzte Messung; T-Mess = Temp. an Messstelle

Tabellen aus Kapitel 5:

Tabelle 5.1-Anhang: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Vorschubrostfeuerung 450 kW bei der Probenahme mit dem Planfilterkopfgerät bei den Lastzuständen ***hoch*** und ***niedrig***

Planfiltermessungen im Lastzustand	Brennstoff-nummer	Leistung in %	T-Mess in °C	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel *
					in mg/MJ		
Planfilter 1	NB21	75	164	11,80	164	193	53
Planfilter 2	NB21	63	151	13,06	233	184	52
hoch (Mittelwert)	NB21	**69**	**158**	**12,43**	**198**	**189**	**52**
Planfilter 3	NB21	50	151	13,54	198	192	38
Planfilter 4	NB21	39	135	14,41	265	191	38
niedrig (Mittelwert)	NB21	**46**	**143**	**13,98**	**232**	**191**	**38**
Gesamtmittelwert	NB21	*57*	*150*	*13,20*	*213*	*190*	*45*

T-Mess = Temperatur an der Messstelle
* mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte Partikelkonzentration
Leistung in % der maximal erzielbaren Leistung bei 100 % Brennstoffeinschub (450 kW)

Tabelle 5.3-Anhang: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Unterschubfeuerung 430 kW während der den Impaktor- und Planfilterprobenahmen (Probenahmedauer jeweils 1h) sowie bei verschiedenen anderen Betriebszuständen ohne Partikelmessung

Betriebszustand und Partikelprobenahme	Brennstoff-nummer	T-Mess in °C	Leistung * in kW	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel **
					in mg/MJ		
PF & Impaktor 1	NB22	134	141	15,66	698	65	59
PF & Impaktor 2	NB22	120	108	16,43	641	61	47
PF & Impaktor 3	NB22	126	113	16,26	494	66	59
PF & Impaktor 4	NB22	113	99	16,77	747	59	57
Gesamtmittelwert	NB22	*121*	*116*	*16,19*	*623*	*61*	*56*

T-Mess = Temperatur an der Messstelle PF = Planfilter
* Die Leistung wurde anhand der gemessenen Abgasgeschwindigkeit, Abgastemperatur und Brennstoffzusammensetzung über die Verbrennungsrechnung ermittelt
** mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte Partikelkonzentration

Tabelle 5.4-Anhang: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der 150 kW Versuchsanlage während der Partikelprobenahmen bei Variation des Luftüberschusses (Probenahmedauer je 1h)

Luftüberschuss	Brennstoffnummer	T-Mess in °C	Leistung in kW	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel *
					in mg/MJ		
1 hoch	SP18	135	116	12.13	64	231	27
2 hoch	SP18	130	104	13.32	82	268	31
3 mittel	SP18	129	113	12.13	71	291	27
4 mittel	SP18	139	139	9.60	43	357	22
5 niedrig	SP18	123	126	9.73	53	358	19
6 niedrig	SP18	128	129	8.47	90	407	35

T-Mess = Temperatur an der Messstelle
* mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte Partikelkonzentration

Tabelle 5.5-Anhang: Mittelwerte der Emissionskonzentrationen an der Versuchsanlage 150 kW während der Partikelprobenahmen bei Variation der Feuerungsleistung (parallele Impaktor- und Planfilterprobenahme) und am Gewebefilter (Probenahmedauer jeweils 1h)

Feuerungsleistung	Brennstoffnummer	T-Mess in °C	Leistung in kW	O_2 in Vol.%	CO	NO_x	Partikel *
					in mg/MJ		
1 hoch	SP18	119	108	9,08	55	393	17
2 hoch	SP18	122	122	7,49	38	471	12
hoch (Mittelwert)		***121***	***115***	***8,3***	***47***	***433***	***15***
3 mittel	SP18	88	72	9,30	45	376	6
4 mittel	SP18	88	67	11,42	54	399	12
mittel (Mittelwert)		***88***	***70***	***10,4***	***50***	***387***	***10***
Messung im Roh- und Reingas am Gewebefilter (Impaktoren und Planfilter zeitversetzt)							
5 PF Rohgas	SP18	109	83	12,58	375	360	30
6 PF Reingas							2

Imp = Impaktormessung; PF = Planfiltermessung; T-Mess = Temperatur an der Messstelle
* mit dem Planfilterkopfgerät ermittelte Partikelkonzentration