

Feldmesskampagne

Partikelemissionen aus Holzfeuerungen

Untersuchung der Partikelfrachten in Holzfeuerungsabgasen unter Praxisbedingungen

Autoren:

Ueli Wieser, dipl. Biol. Uni BS
T: +41/(0)62 387 31 35
wieser@oekozentrum.ch

Christian Gaegauf, dipl. Ing. ETH/SIA
T: +41/(0)62 387 31 26
gaegauf@oekozentrum.ch

Yves Macquat, dipl. Ing. FH
T: +41/(0)62 387 31 37
macquat@oekozentrum.ch

Langenbruck, Juli 2001

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
1 Einleitung.....	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Projektziel	4
2 Staub- und Partikelanalytik	5
2.1 Projektphase 1: Messaufbau Evaluation Analytik.....	5
2.2 Projektphase 2: Messaufbau der Feldmesskampagne.....	7
3 Untersuchte Anlagen	9
4 Messresultate	10
4.1 Darstellung der Resultate.....	10
4.2 Stückholz-Feuerstätten.....	10
4.3 Stückholzkessel	12
4.4 Pelletfeuerungen	13
4.5 Holzschnitzelfeuerungen	14
4.6 Fossilbetriebene Energieanlagen	16
4.7 Zusammenstellung der Emissionsdaten aus der Verbrennung von Holzbrennstoffen.....	18
4.8 Zusammenstellung der Emissionsdaten für Anlagen mit fossilen Brennstoffen.....	18
5 Diskussion	20
5.1 Gesamtstaub vs. PM0.6-Bestimmung mittels SMPS-Analytik.....	20
5.2 Partikelgrößenverteilung	22
5.3 Partikelemissionsfaktoren.....	25
6 Schlussfolgerungen.....	27
Danksagung.....	29
Literatur.....	29
Anhang.....	30
Daten der untersuchten Anlagen	30

Auftraggeber - Bundesamt für Wald, Umwelt und Landschaft (BUWAL)
 - Bundesamt für Energie (BFE)
 in Zusammenarbeit mit den Kantonen
 - Aargau, Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Bern, Luzern und Solothurn

Diese Arbeit ist im Auftrag der Bundesämter BUWAL und BFE entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Abstract

Wood combustion processes produce smoke emissions, which are of concern to authorities and the public. Recent European studies claim airborne particulate matter (PM) smaller than 10 μm (PM10) as major respiratory irritants (*Air pollution and Health*, EC-APHEA I and II). The Swiss Federal Environmental Protection Agency (BUWAL) requires emission factors on PM pollutants of various sources in order to establish strategies for aerosol abatement. The work carried out by the *Center of Appropriate Technology and Social Ecology* covered the investigations of typical wood fuel combustion systems in the field under real world conditions. This to cope with the lack of quantified PM emission factors and characterization in terms of particle number and size distribution.

Two analytical methods were used to monitor PM emissions. A *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS) was utilized to determine nanoparticle numbers and size distribution in wood combustion stack gases with a mobility diameter from 0.015 up to 0.6 μm (PM0.6). *Total Suspended Particles* (TSP) were measured simultaneously to compare TSP with the emissions of PM0.6, calculated from the SMPS-analysis.

Totally 14 different wood combustion systems were tested including room heating appliances, wood log and automatic fed boilers. The wood based fuel comprised logs, chips and pellets. It could be shown that the major part of the particle sizes is in the range of 30 to 300 nm. Particles coarser than 300 nm do not add substantially to the total emission rate in the flue gases. The particle distribution of manual operated appliances is quite varying during a burn cycle, while wood log and continuous fed boilers show a fairly constant particle size distribution. In each category there have been found low emission equipment. The minimum emission factor of total particle number of the different combustion systems was found in the range of approximately 1:3.8, where as the maximum was widely spread. The TSP emission factors correspond fairly well with the figures calculated from SMPS data as PM0.6 mass based emission factors, if there were little products of incomplete combustion (PIC) and no high grate vent entraining ash particles. The data resulting from these investigations allow prediction of the PM on a particular airshed of a population of different wood combustion systems.

For comparison there have been tested several fossil fueled boilers and co-generation plants. The average PM0.6 emission factor is of a factor 16 lower than the one in wood stack gases.

Keywords: wood combustion, biomass, particulate matter, emission factor, field measurement, fossil fuel

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Neuste Ergebnisse der europäischen Studie über die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit, APHEA (Air pollution and health), zeigen, dass Feinstaub im Mikron- und Submikronbereich (Partikeldurchmesser $d_p < 10$ Mikron, PM10) zu den markantesten Schadstoffen in der Atemluft zählt. Um griffige Massnahmen zur Reduktion von Feinstäuben treffen zu können, ist es erforderlich, die Feinpartikelquellen zu quantifizieren.

Zur Zeit befassen sich verschiedene Forschungsprojekte mit Feinpartikelemissionen aus dem Strassen- und Schienenverkehr, da diese einen Anteil von etwa 36 % der PM10-Luftbelastung /1/, /2/ verantworten. Bei der Verbrennung von Holz entstehen auch Feinpartikel. Allerdings beträgt der Anteil von Partikeln aus sämtlichen Heizungsanlagen an der gesamten PM10-Belastung je nach Schätzung nur etwa 2 bis 5 % /3/. Um Quellenzuteilungen machen zu können, gilt es Kenntnisse über die Partikelemissionen im Mikron- und Submikronbereich von Holzfeuerungen zu gewinnen. Dazu sind Praxiserhebungen von Feinstaub aus Holzfeuerungsabgasen erforderlich.

In seinem *Labor für nachhaltige Energiesysteme* hat das Ökozentrum in Kooperation mit der ETH Zürich und den Fachhochschulen Aargau und Bern eine Infrastruktur zur Analyse von Partikelemissionen aus Verbrennungsprozessen aufgebaut. Die Partikelmessinstrumente eignen sich auch für ambulante Messungen im Feld. In einer ersten Projektphase wurde der Messaufbau an vier ausgewählten Anlagen kleinerer Leistung (< 100 kW) im Labor getestet. Dabei wurden der Gesamtstaub (total suspended particles, TSP) und die Partikel nach Anzahl und Grössenverteilung in den Abgasen ermittelt. Die TSP-Staubmessung basierte auf gravimetrischen Filtermessungen. Die Messung der Feinstaubfraktionen erfolgte mit einem laseroptischen Aerosolspektrometer (LOAS) in 15 Klassen zwischen 0.3 und 20 μm . Die Messung der Fraktionen von 0.01 bis 0.4 μm basierte auf der Mobilitätsanalyse mit DMA (differential mobility analyzer) und CPC (condensation particle counter) Analytik und SMPS Software (scanning mobility particle sizer). Aufgrund der Messergebnisse in der ersten Projektphase wurde für die Feldmessungen auf das LOAS-Gerät verzichtet, da der grösste Anteil der Feinpartikel im Bereich zwischen 30 - 200 nm liegt.

Die Ergebnisse der erste Projektphase wurden im Bericht *Entwicklung und Test eines Messverfahrens für ambulante Erfassung der Partikelfrachten in Holzfeuerungsabgasen* /4/ zusammengefasst.

1.2 Projektziel

An einem Querschnitt von typischen Vertretern verschiedener Holzfeuerungen galt es die Emissionsfaktoren für Feinstaub unter 600 nm Durchmesser zu erheben. Die Analytik hatte neben den Emissionsfaktoren zusätzliche Aussagen bezüglich der Partikelanzahl und -grössenverteilung zu liefern. Die Partikeluntersuchungen waren zu ergänzen mit Gesamtstaubmessungen. Aufgrund der Emissionsdaten sollen sich für eine gegebene Population von Holzfeuerungen Hochrechnungen zu ihren Quellenanteilen an Feinpartikeln machen lassen.

Um die Kenntnisse über den Partikelausstoss von Anlagen mit fossilen Brennstoffen zu gewinnen und um Vergleichszahlen vorliegen zu haben, wurden auch mit Heizöl und Gas betriebene Kessel und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen untersucht.

2 Staub- und Partikelanalytik

In einer ersten Projektphase lag das Schwergewicht auf der Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens für die Staub- und Partikelemissionen vor Ort. Diese Untersuchungen fanden unter Laborbedingungen statt. Mit den gewonnenen Kenntnissen wurde ein Messsystem aufgebaut, das in der zweiten Projektphase bei den Felduntersuchungen der verschiedenen Anlagen seinen Einsatz fand.

2.1 Projektphase 1: Messaufbau Evaluation Analytik

Die Evaluation der geeigneten Messverfahren für die ambulante Partikelmessungen wurden im *Labor für nachhaltige Energiesysteme* am Ökozentrum Langenbruck durchgeführt. Der Laboraufbau basiert auf dem ISO-Normenentwurf ISO/DIS 13336 (Solid fuel burning appliances) /2/. Die Messeinrichtungen mit Abgaskamin und Abgas-Verdünnungstunnel erlauben die Analyse der Verbrennungspartikel im Kamin wie auch unter immissionsnahen Bedingungen im Verdünnungstunnel (Abbildung 1). Damit lassen sich mögliche Verschiebungen der Partikelgrößenverteilung durch Kondensation oder Rekoagulation unter Immissionsverhältnissen aufzeigen.

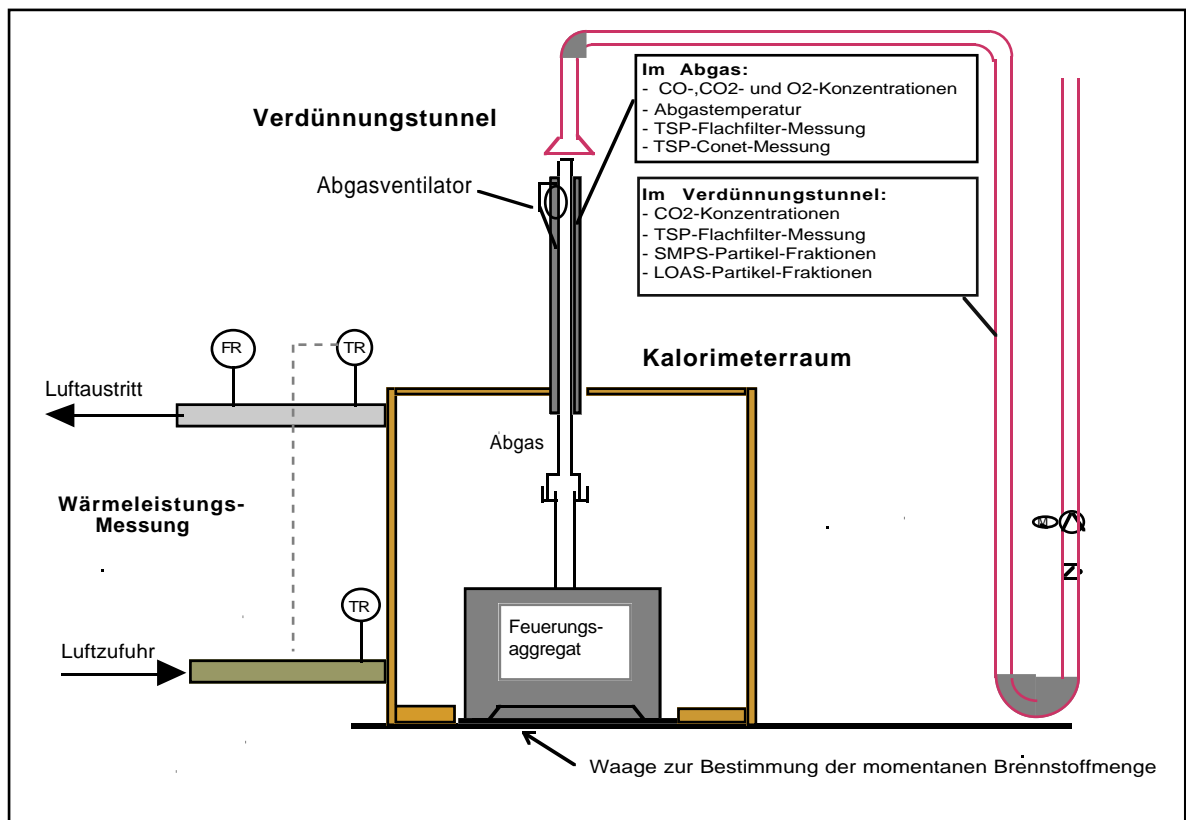


Abbildung 1 Labormessaufbau in der Projektphase 1 zur Evaluation der Messanalytik. Das Layout von Kalorimeterraum und Abgas-Verdünnungstunnel basiert auf dem ISO/DIS-Prüfnormenentwurf 13336 /5/.

2.1.1 Gesamtstaubmessung (TSP)

Für die gravimetrische Gesamtstaubmessung (total suspended particles, TSP) gelangten zwei unterschiedliche Messverfahren zur Anwendung. Die TSP-Basiswerte der untersuchten Holzfeuerungen lieferte das gängige Quarzfilterhülsen-Messverfahren (Emissions-Messempfehlung, BUWAL 1996, /6/).

Parallel dazu wurden TSP-Messungen mit Planfilter in Anlehnung an das US/EPA-Messverfahren /7/ bzw. die ISO/DIS 13336-Norm durchgeführt, um die beiden Messprinzipien vergleichen zu können (Abbildung 2). Bei den Holz-Feuerstätten und der Pelletfeuerung befand sich die Partikelentnahmestelle am Abgaskamin und im Verdünnungstunnel.

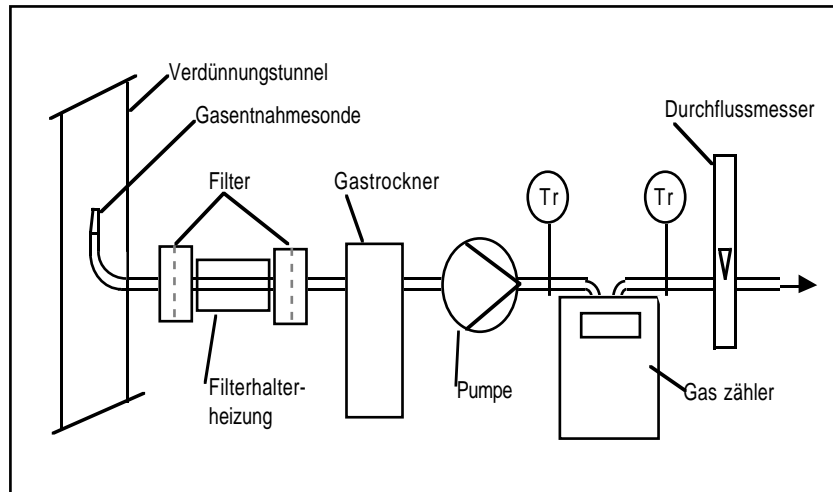


Abbildung 2 Gravimetrische Gesamtstaubmessung mit Planfilter (Messaufbau basiert auf ISO/DIS-Prüfnormentwurf 13336 /5/ und US/EPA-Messverfahren /7/).

Im Hinblick auf die PM₁₀-Immissionsgrenzwerte ist es von Interesse, die Partikelfractionen der Holzfeuerungen zu kennen. Für die PM₁₀-Emissionsmessung wurde parallel zur TSP-Messung ein Zyklonfilterhaltersystem verwendet. Das System besteht aus einem verschraubbaren Teflongehäuse als Filterhalter, dem ein Zyklonabscheider vorgeschaltet ist. Eine Heizung thermostatisiert das Filtergehäuse auf 120 °C, um Kondensation zu verhindern. Filter und Backupfilter sind in einem Gehäuse integriert. Im Filterhalter werden die Filter von teflonbeschichteten Stützgeräten getragen, die konische Löcher aufweisen.

2.1.2 Fraktionierte Partikelmessung $300 \text{ nm} < dp < 20 \text{ }\mu\text{m}$

Das verwendete Partikelmessgerät (Grimm, Typ 1.108) vermag Aerosole im Bereich von 300 nm bis 20 μm kontinuierlich zu erfassen. Alle 6 Sekunden gibt das Gerät Messwerte aus, die es erlauben, eine Echtzeitmessung der Partikelkonzentrationen (Partikelanzahl/Liter) durchzuführen. Das Messprinzip basiert auf der Streulichtmessung der Einzelpartikel, wobei ein Halbleiterlaser als Lichtquelle dient (Laseroptischer Aerosolspektrometer, LOAS). Durchqueren Partikel den Laserstrahl, geben sie Lichtimpulse ab. Das Signal wird nach entsprechender Verstärkung in 15 Größenkanäle klassifiziert. Auswechselbare Düsen mit verschiedenen Querschnitten ermöglichen eine isokinetische Absaugung der Abgase. Kalte Umgebungstemperaturen (< 10 °C) und eine hohe Feuchtigkeit des Abgases führen zu Kondensatbildung im Partikelmessgerät. Es kann aus diesem Grunde nur im verdünnten Abgas eingesetzt werden.

2.1.3 Fraktionierte Partikelmessung $10 \text{ nm} < dp < 500 \text{ nm}$

Mit der SMPS-Messausrüstung (scanning mobility particle sizer, TSI, 3936 Series) wurden Partikelkonzentrationen in 64 Größenklassen von 12 bis 572 nm bestimmt. Ein mechanischer Impaktor mit 50% Abscheidecharakteristik bei 650 nm separierte die groben Staubpartikel. Die Partikel im Probegas wurden danach mit einer radioaktiven Quelle bipolar ionisiert und im DMA (differential mobility analyzer, TSI 3080) in einem konstanten Luftstrom auf Grund eines variablen elektrischen Feldes nach

ihrer Massenmobilität selektioniert. Zum Nachweis und Zählen der selektionierten Partikel wurden diese in einer gesättigten Alkoholatmosphäre durch Kondensation vergrößert und im CPC (condensation particle counter, TSI 3010) optisch erfasst. Die Partikel wurden als Funktion des jeweiligen elektrischen Feldes, das auf Grund der Massenmobilität die Kanalbreite respektive den mittleren Partikeldurchmesser bestimmte, gezählt. Die Summe aller gezählten Partikel über den ganzen Messbereich entsprach demnach der Gesamt-Anzahlkonzentration (total number concentration, TNC). Die Steuerung von DMA und CPC erfolgte mit der SMPS-Software (TSI, V. 3.2). Ein Scan für die Partikelgrößenverteilung dauerte minimal 1 Minute. Aus statistischen Gründen ist eine Scanzeit von 2^{1/2} Minuten gewählt worden.

2.2 Projektphase 2: Messaufbau der Feldmesskampagne

Aufgrund der Erfahrungen in der ersten Projektphase wurde der Gesamtstaub (TSP) mittels Planfilter und die Partikelgrößenverteilung (number concentration NC = f(dp) mit dem SMPS-Messgerät im Bereich von 12 bis 570 nm bestimmt (Abbildung 3).

2.2.1 Bestimmung TSP

Die Abgasentnahme für die *Gesamtstaubmessung* erfolgte über eine Absaugsonde im Abgasrohr mit einem 90° gekrümmten Chromstahlrohr mit auswechselbaren Düsen aus Aluminium. Mit den verschiedenen Absaugdüsen konnte die isokinetische Probenahme und das erforderliche Absaugvolumen für eine genügende Staubmenge justiert werden. Das Filterhaltersystem bestand aus zwei verschraubbaren Chromstahlgehäusen, die über ein Chromstahlrohr miteinander verbunden sind. Eine Beheizung hielt das Filterhaltersystem auf 120°C (±15°C). Für die Messungen wurden Flachfilter (Pall, T60A20) verwendet.

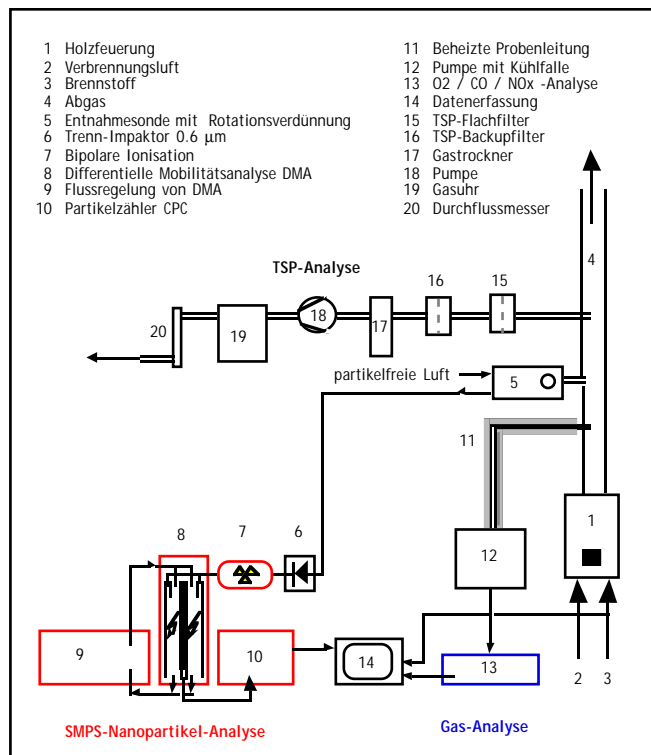


Abbildung 3 Messaufbau in der Feldmesskampagne zur Bestimmung von Gesamtstaub, Partikeln und gasförmigen Emissionen in den Abgasen.

2.2.2 Bestimmung der Partikelgrössenverteilung

In einer beheizten Sonde wurde der Abgasprobestrom mit filtrierter Verdünnungsluft gemischt. Der Verdünnungsfaktor kann über die Drehzahl einer perforierten Mischscheibe, die Probegasvolumina in die Mischkammer überführt, konstant eingestellt werden. Um Kondensatpartikel im Probegas zu verhindern, wurde der Verdünnungsfaktor auf 200 festgelegt. Der Taupunkt von Wasserdampf lag damit immer deutlich unter der Umgebungstemperatur.

Die anschliessende Bestimmung der Partikelgrössenverteilung mit der SMPS-Messausrüstung geschah analog wie in Projektphase 1. Die SMPS-Geräteeinstellungen wurden für alle untersuchten Anlagen wie folgt festgelegt:

- Volumenstrom Probegas: 0.4 l/min
- Volumenstrom DMA (Schild): 4.0 l/min
- Upscan (Analyse): 240 sec
- Downscan (Reset): 60 sec
- 3 Samples pro Anlage
- 5 Scans pro Sample
- Korrektur der Ladungsverteilung gemäss Software TSI V. 3.2

3 Untersuchte Anlagen

Mit der Auswahl der Feuerungen wurde versucht, einen repräsentativen Querschnitt von holzbefeuerten Anlagen zu treffen. Die Feuerungen lassen sich in die folgenden Kategorien gliedern:

- Holz-Feuerstätten (Cheminée- und Speicheröfen)
- Stückholzkessel
- Pelletfeuerungen (Kessel und Zimmeröfen)
- Schnitzelfeuerungen (Grün- und Trockenschnitzel, Restholz)

Zu Vergleichszwecken gelangten fossil befeuerte Anlagen (Kessel und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen) zur Untersuchung.

Die Auswahl der Anlagen erfolgte in Abstimmung mit den Behörden der mitwirkenden Kantone, die die geeigneten Anlagen bezeichneten und den Kontakt zu den Betreibern herstellten.

Tabelle 1 **Untersuchte Anlagen**

Bezeichnung	Typ	Brennstoff	Nennleistung [kW]	Baujahr
Holzfeuerungen				
<i>Projektphase 1</i>				
A	Cheminéeofen	Stückholz	6	1999
B	Speicherofen (Specksteinofen)	Stückholz	6	1997
C	Pelletkessel	Pellet	16.5	1999
D	Unterschub-Schnitzelfeuerung	Trockenschnitzel	70	1990
<i>Projektphase 2</i>				
1	Unterschub-Schnitzelfeuerung	Trockenschnitzel	200	1986
2	Schieberost-Schnitzelfeuerung	Grünschnitzel	325	1996
3	Schieberost-Schnitzelfeuerung	Grünschnitzel	800	1994
4	Vorofen-Restholzfeuerung	Restholz	200	1990
5	Stückholzkessel	Stückholz	25	1996
6	Stückholzkessel	Stückholz	70	1998
7	Cheminéeofen	Stückholz	7.0	2000
8	Speicherofen (Kachelofen)	Stückholz	3.0	1997
9	Pelletkessel	Pellet	25	2000
10	Pelletofen	Pellet	10	1998
Anlagen mit fossilen Brennstoffen				
11	Öl-/Gas-Kombikessel	Heizöl EL	465	1994
12	Öl-/Gas-Kombikessel	Heizöl EL	1165	1994
13	Diesel-Blockheizkraftwerk	Heizöl EL	90 _{th} /70 _{el}	1995
14	Gaskessel	Erdgas	190	1999
15	Mini-Gas-Blockheizkraftwerk	Erdgas	12.5 _{th} /4.7 _{el}	1998
16	Gas-Blockheizkraftwerk	Erdgas	50 _{th} /15 _{el}	1994

Die Details zu den untersuchten Anlagen finden sich zusammen mit einem Beschrieb des Betriebes während der Messungen im Anhang.

Mit Ausnahme der Anlagen der Projektphase 1 sowie den Feuerstätten Nr. 7 und 8 basieren alle erhobenen Daten auf in situ Messungen unter den jeweilig spezifischen Praxisbedingungen.

4 Messresultate

4.1 Darstellung der Resultate

Die Messresultate der durchgeführten Gesamtstaub- und Partikelmessungen sind als Emissionsfaktoren angegeben, die auf dem unteren Heizwert des *zugeführten* Brennstoffs und der *trockenen* Brennstoffmasse basieren. Die Emissionsfaktoren für Partikel < 600 nm sind in Anlehnung an die gängige Abkürzung von PM10 (particulate matter < 10 µm) mit PM0.6 bezeichnet. Die PM0.6-Emissionsfaktoren basieren sowohl auf der Partikelanzahl wie auf der Partikelmasse. Die Partikelanzahl (mit Symbol # aufgeführt) folgt unmittelbar aus den SMPS-Messungen.

Die Partikelmasse ist eine Abschätzung, die auf Grund einer angenommenen Partikelgeometrie und -dichte basiert. Für die Partikelform ist eine kugelförmige Geometrie angenommen worden. Die Partikeldichte wurde mit einem konstanten Wert von 1500 kg/m³ angenommen.

Für Vergleichszwecke mit aus anderen Messungen vorliegenden Emissionswerten sind die Kohlenmonoxidwerte (CO) und der Gesamtstaub auch mit den gängigen Konzentrationswerten aufgeführt. Diese Werte sind für alle Anlagen auf 13 % Sauerstoff bezogen.

Die Darstellung der Partikelverteilung erfolgte nach der in der Aerosolmesstechnik üblichen Weise. Der Durchmesser der Partikel (dp), der sich aus der Kanalbreite des Mobilitätsanalysegerätes ableitet, wurde logarithmisch dargestellt. Die kanalspezifische Partikel-Anzahlkonzentration (number concentration, NC) wurde errechnet aus dem Quotient der bei dieser Kanalbreite gezählten Anzahl Partikel (dN) und dem Logarithmus der Kanalbreite (dlog(dp)), wobei (dp) dem Mobilitätsdurchmesser der Partikel entspricht.

4.2 Stückholz-Feuerstätten

4.2.1 Emissionswerte

Die Messungen an den Cheminée- und Speicheröfen wurden im Labor des Ökozentrums Langenbruck durchgeführt. Die Laborinfrastruktur erlaubte verlässlichere Messungen als dies im Felde möglich gewesen wäre. Die Labormessungen verliefen unter sehr praxisnahen Bedingungen.

Bei den Cheminéeöfen dauerte eine Messperiode vom Auflegen bis zum vollständigen Abbrand der Brennstoffcharge, wobei mindestens drei Abbrände erfasst wurden. Eine Brennstoffcharge wurde auf die Grundglut gelegt. Anhand einer Abbrandwaage wurde das Versuchsende eruiert. Die aufgeführten Messwerte sind die Mittelwerte aus 3 Abbränden.

Entsprechend dem Praxisbetrieb von Speicheröfen erfolgten die Emissionsmessungen über einen Abbrand ohne Nachlegen von Holz. Die Brennstoffcharge wurde in den ausgekühlten Brennraum gelegt und entzündet. Ein Messzyklus startete mit dem Anzünden und endete nach vollständigem Abbrand der Brennstoffcharge. Die Resultate sind aus den Mittelwerten von mindestens drei einzelnen Abbränden ermittelt.

Tabelle 2 *Stückholz-Feuerstätten: Emissionen*

Feuerung	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid	Staubgehalt ¹⁾ [mg/m _n ³]	Emissionsfaktor Staub ²⁾ [mg/ MJ]	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾ [#/MJ]	Emissionsfaktor Partikelmasse ^{2) 3)} [mg/ MJ]	MODE- Durchmesser [nm]
	COst ¹⁾ [mg/m _n ³]					
Cheminéeofen (A)	1930	35.5	24.5	5.7 * 10 ¹³	39.9	55
Cheminéeofen (7)	4646	163	111	5.0 * 10 ¹³	283	103
Speicherofen (B)	3271	137	93	9.1 * 10 ¹³	98	50
Speicherofen (8)	2835	356	241	21.6 * 10 ¹³	1040	63

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m_n³

4.2.2 Partikelgrößenverteilung

Bei allen Chargenfeuerungen lässt sich während des Abbrandes eine deutliche Veränderung der Partikelgrößenverteilung beobachten. So liegt beispielsweise beim Cheminéeofen nach dem Auflegen des Scheitholzes auf die Grundglut das Maximum der Partikel-Anzahlkonzentrationen (most frequent diameter, MODE) bei Mobilitätsdurchmessern um 200 nm. Der MODE-Durchmesser verringert sich während des Abbrandes kontinuierlich bis auf 30 nm, bei gleichzeitiger Zunahme der Partikelanzahl (Abbildung 4).

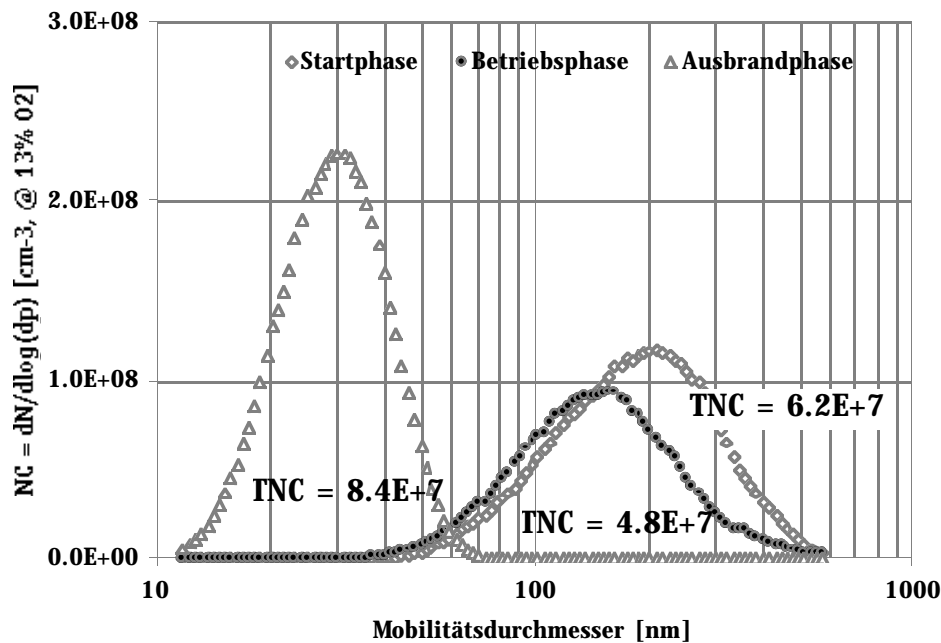


Abbildung 4 Cheminéeofen (7): Partikelgrößenverteilung während den verschiedenen Abbrandphasen (Abbranddauer 57 Minuten); TNC: Partikel-Anzahlkonzentration [# /cm³].

Auch im Speicherofen ändert die Partikelgröße über einen Abbrand. Nach dem Anzünden erreicht das Maximum der Partikel-Anzahlkonzentrationen Mobilitätsdurchmesser um 100 nm. Der MODE-Durchmesser verringert sich während des Abbrandes ebenfalls kontinuierlich bis auf 30 nm (Abbildung 5), bei einer leichten Zunahme der Partikelkonzentration NC im Vergleich zur Betriebsphase.

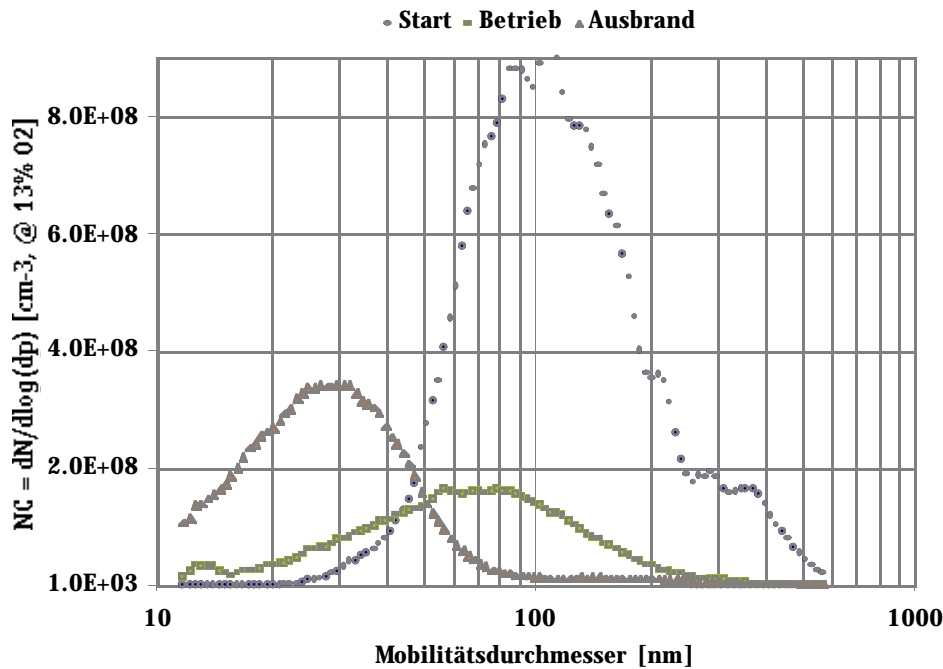


Abbildung 5 Speicherofen (8): Partikelgrößenverteilung während den verschiedenen Abbrandphasen.

4.3 Stückholzkessel

4.3.1 Emissionswerte

Beide untersuchten Stückholzkessel basierten auf dem Feuerungsprinzip des Unterabbrandes. Beide Kessel verfügten zudem über eine Abbrandregelung. Die Emissionsmessungen erfolgten während eines Abbrandes bei Nennleistung. Die Daten sind jeweils Mittelwerte aus 3 bis 4 Abbränden.

Tabelle 3 *Stückholzkessel: Emissionen*

Feuerung	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid COst ¹⁾ [mg/m _n ³]	Staubgehalt ¹⁾ [mg/m _n ³]	Emissionsfaktor Staub ²⁾ [mg/ MJ]	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾ [#/MJ]	Emissionsfaktor Partikelmasse ^{2) 3)} [mg/ MJ]	MODE-Durchmesser [nm]
Stückholzkessel (5)	25	24	16	6.7 * 10 ¹³	8	43
Stückholzkessel (6)	878	61	39	5.2 * 10 ¹³	15	51

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m_n³

4.3.2 Partikelgrößenverteilung

Beide Kessel weisen eine ähnliche Partikelgrößenverteilung auf. In der linearen Darstellung der Größenverteilung variieren beide Systeme während des Abbrandes nur sehr geringfügig, deren MODE-Durchmesser liegen bei 50 bis 60 nm (Abbildung 6). Werden hingegen die Partikel-

Anzahlkonzentrationen auf einer logarithmischen Achse dargestellt, können weitere typenspezifische Unterschiede erkannt werden. Beispielsweise bildet der Kessel 6 deutlich weniger kleine, dafür aber mehr grössere Partikel.

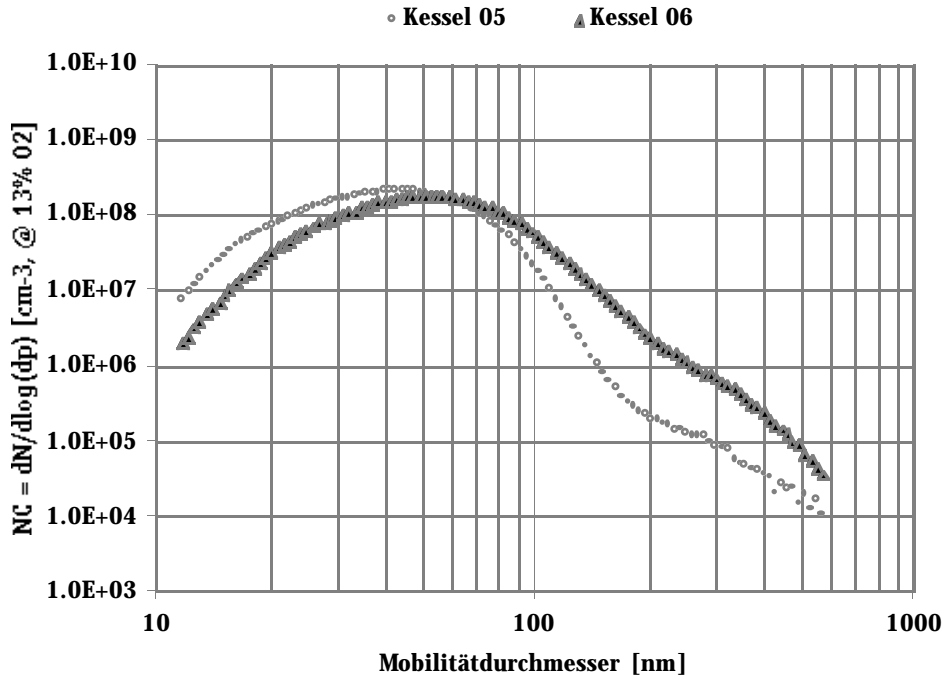


Abbildung 6 Stückholzkessel (5) und (6): Partikelgrößenverteilung.

4.4 Pelletfeuerungen

4.4.1 Emissionswerte

Die Messungen wurden an einem Pelletofen und zwei Pelletkesseln durchgeführt. Sämtliche Emissionsmessungen an den Pelletfeuerungen wurden bei Nennlast durchgeführt.

Tabelle 4 Pelletfeuerungen: Emissionen

Feuerung	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid COst ¹⁾ [mg/m _n ³]	Staubgehalt ¹⁾ [mg/m _n ³]	Emissionsfaktor Staub ²⁾ [mg/ MJ]	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾ [#/MJ]	Emissionsfaktor Partikelmasse ^{2) 3)} [mg/ MJ]	MODE-Durchmesser [nm]
Pelletofen (10)	357	80	54	8.6 * 10 ¹³	164	52
Pelletkessel (9)	100	30	20	4.0 * 10 ¹³	18	55
Pelletkessel (C)	11	28	19	1.3 * 10 ¹³	9	85

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m_n³

4.4.2 Partikelgrößenverteilung

Das Maximum der Partikel-Anzahlkonzentrationen (MODE) liegt bei beiden Feuerungen um 50 nm. Die Partikelverteilung bleibt bei gleichbleibenden Betriebsparametern sehr stabil (Abbildung 7). Durch die instabile Verbrennung im Pelletofen ist die Anzahl der grösseren Partikel gegenüber dem Pelletkessel erhöht.

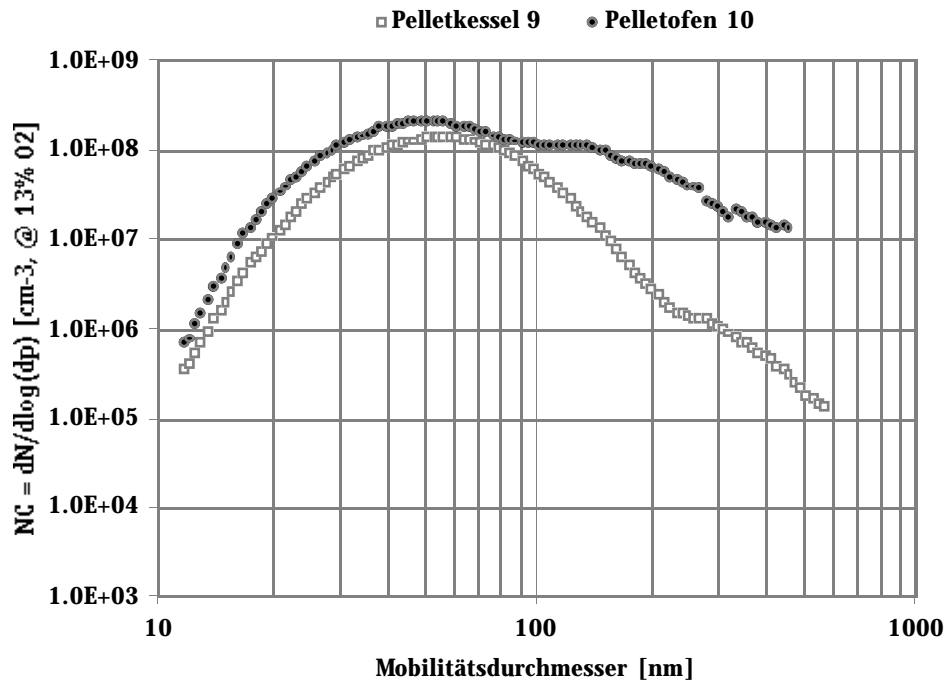


Abbildung 7 Pelletofen (10) und Pelletkessel (9): Partikelgrößenverteilung im Nennlastbetrieb.

4.5 Holzschnitzelfeuerungen

4.5.1 Emissionen

Die untersuchten Schnitzelfeuerungen umfassten Unterschub-, Schieberost- und Vorofensysteme. Als Brennstoffe kamen Trocken- und Grünschnitzel sowie Restholz zum Einsatz. Die Feuerungen wurden in verschiedenen Lastzuständen von Nominal- und Teillast sowie bei Glutunterhalt ausgemessen. Die verschiedenen Lastzustände ergaben sich aus den Randbedingungen des Praxisbetriebes.

Tabelle 5 *Holzsnitzelfeuerungen: Emissionen*

Feuerung	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid	Staubgehalt ¹⁾	Emissionsfaktor Staub ²⁾	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾	Emissionsfaktor Partikelmasse ^{2) 3)}	MODE-Durchmesser
	COst ¹⁾					
	[mg/m _n ³]	[mg/m _n ³]	[mg/ MJ]	[#/MJ]	[mg/ MJ]	[nm]
Trockenschnitzel Unterschubfeuerung (D)	1035	117	79	4.8 * 10 ¹³	26	71
Trockenschnitzel Unterschubfeuerung (1)	4384	163	109	14 * 10 ¹³	65	66
Grünschnitzel Schieberostfeuerung (2)	236	58	42	4.7 * 10 ¹³	32	85
Grünschnitzel Schieberostfeuerung (3)	991	75	55	5.2 * 10 ¹³	47	81
Restholz Vorofenfeuerung (4)	1793	96	64	8.2 * 10 ¹³	59	71

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m_n³

4.5.2 Partikelgrößenverteilung

Das Maximum der Partikel-Anzahlkonzentrationen liegt bei 80 nm. Die Partikelverteilung bleibt in den Phasen konstanter Betriebsbedingungen sehr stabil (Abbildung 8).

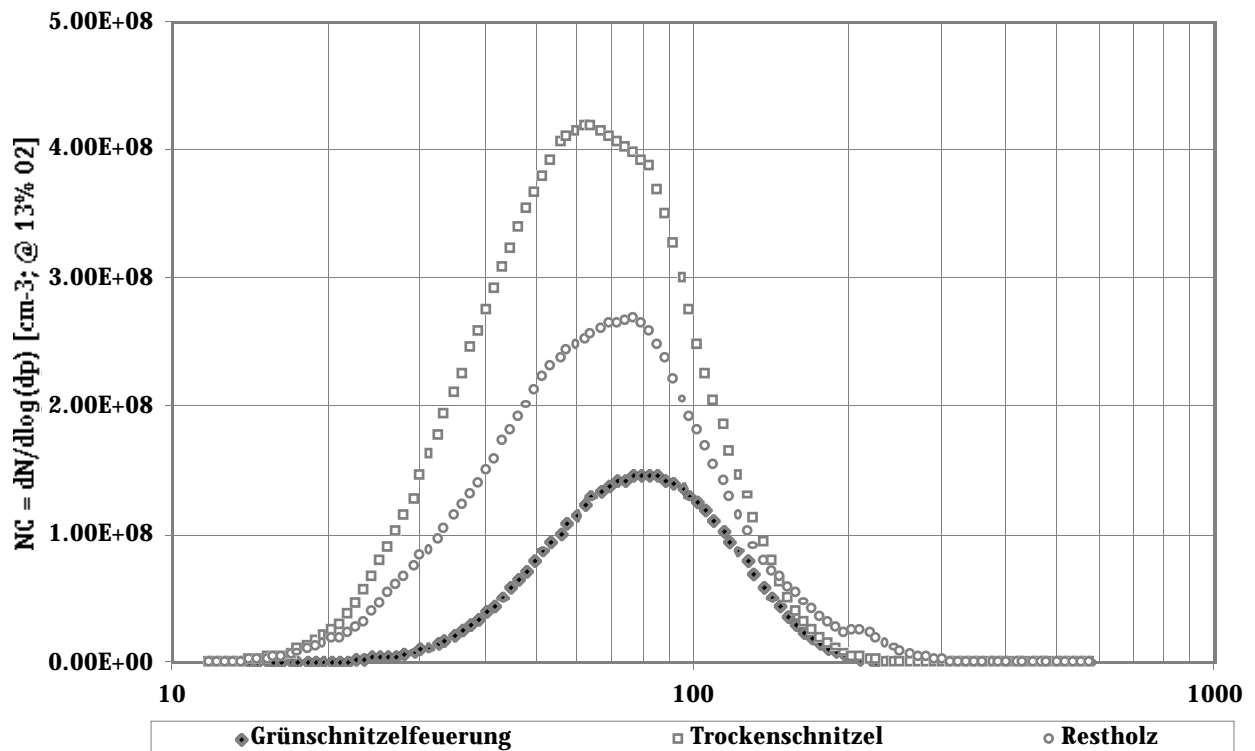


Abbildung 8 Holzsnitzelfeuerung: Partikelgrößenverteilung.

4.6 Fossilbetriebene Energieanlagen

In Ergänzung zu den Untersuchungen der Partikelemissionen von Holzfeuerungen wurden Energieanlagen ausgemessen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben sind. Zur Untersuchung gelangten Kessel- und Wärme-Kraftanlagen mit Gas und Heizöl EL als Brennstoff.

4.6.1 Heizölbetriebene Energieanlagen

Die untersuchten Energieanlagen umfassten zwei Ölkessel und ein Blockheizkraftwerk (BHKW).

Tabelle 6 **Mit Heizöl EL betriebene Energieanlagen: Emissionen**

Anlage	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid	Staubgehalt ¹⁾	Emissionsfaktor	Emissionsfaktor	Emissionsfaktor	MODE-
	COst ¹⁾		Staub ²⁾	Partikelanzahl ²⁾	Partikelmasse ^{2) 3)}	Durchmesser
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/MJ]	[#/MJ]	[mg/MJ]	[nm]
Öl-Kessel (11)	1	1.8	1.5	$2.8 \cdot 10^{13}$	0.7	19
Öl-Kessel (12)	3	0.8	0.6	$1.1 \cdot 10^{13}$	0.3	28
Diesel-BHKW (13)	0	10	6.5	$0.01 \cdot 10^{13}$	0.2	72

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m³

Die Partikelverteilung der Ölkessel zeigen hohe Partikelkonzentrationen zwischen 20 und 30 nm (Abbildung 9). Demgegenüber weist das Heizöl-BHKW keinen deutlichen MODE-Durchmesser auf. Die Partikelanzahl bewegt sich zwischen 10 und 150 nm auf ähnlichem Niveau. Interessanterweise liegen die Emissionsfaktoren für das BHKW deutlich unter denjenigen der Ölkessel (Tabelle 6).

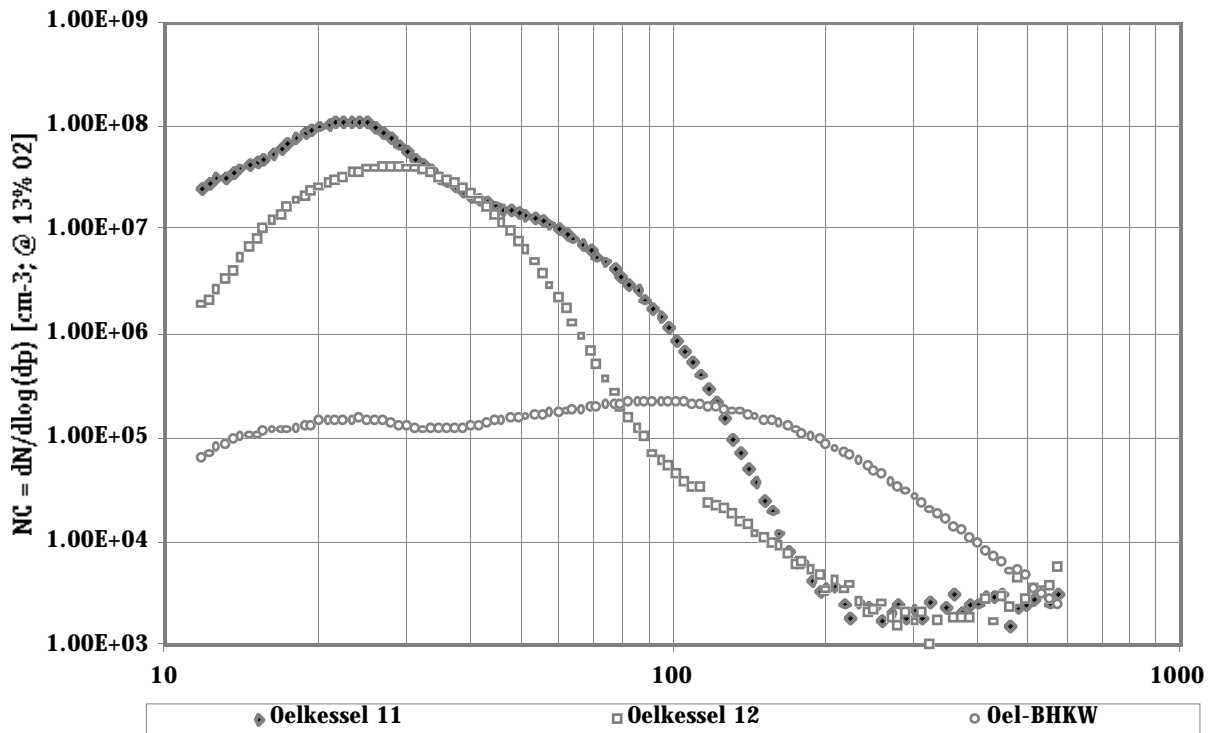


Abbildung 9 Heizölbetriebene Anlagen: Partikelgrößenverteilung.

4.6.2 Erdgasbetriebene Energieanlagen

Die untersuchten Energieanlagen umfassten einen Gaskessel, eine Mini-Wärme-Kraftanlage und ein Blockheizkraftwerk (BHKW).

Tabelle 7 Erdgasbetriebene Energieanlagen: Emissionen

Anlage	Gasförmige Emissionen		Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid COst ¹⁾	Staubgehalt ¹⁾	Emissionsfaktor Staub ²⁾	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾	Emissionsfaktor Partikelmasse ^{2) 3)}	MODE-Durchmesser
	[mg/m _n ³]	[mg/m _n ³]	[mg/ MJ]	[#/MJ]	[mg/ MJ]	[nm]
Gaskessel (14)	16	0.8	0.3	0.002 * 10 ¹³	0	12
Gas-Mini WKK (15)	101	0	0	0.001 * 10 ¹³	0	28
Gas-BHKW (16)	0	0	0	0.002 * 10 ¹³	0	12

¹⁾ @ 13 Vol % O₂

²⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

³⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m³

Die Partikelverteilung des Gaskessels weist keinen deutlichen MODE-Durchmesser auf. Die Partikelanzahl fällt ausgehend von den kleinsten Durchmessern (Abbildung 10). Die gleiche Tendenz ist beim Gas-BHKW zu beobachten, wogegen die Mini-WKK einen deutlichen MODE-Durchmesser bei ca. 30 nm aufweisen. Wie bereits bei der motorischen Verbrennung von Erdöl festgestellt wurde, liegen die PM_{0.6}-Emissionsfaktoren der Wärme-Kraftanlagen unter denjenigen des Gaskessels (Tabelle 7).

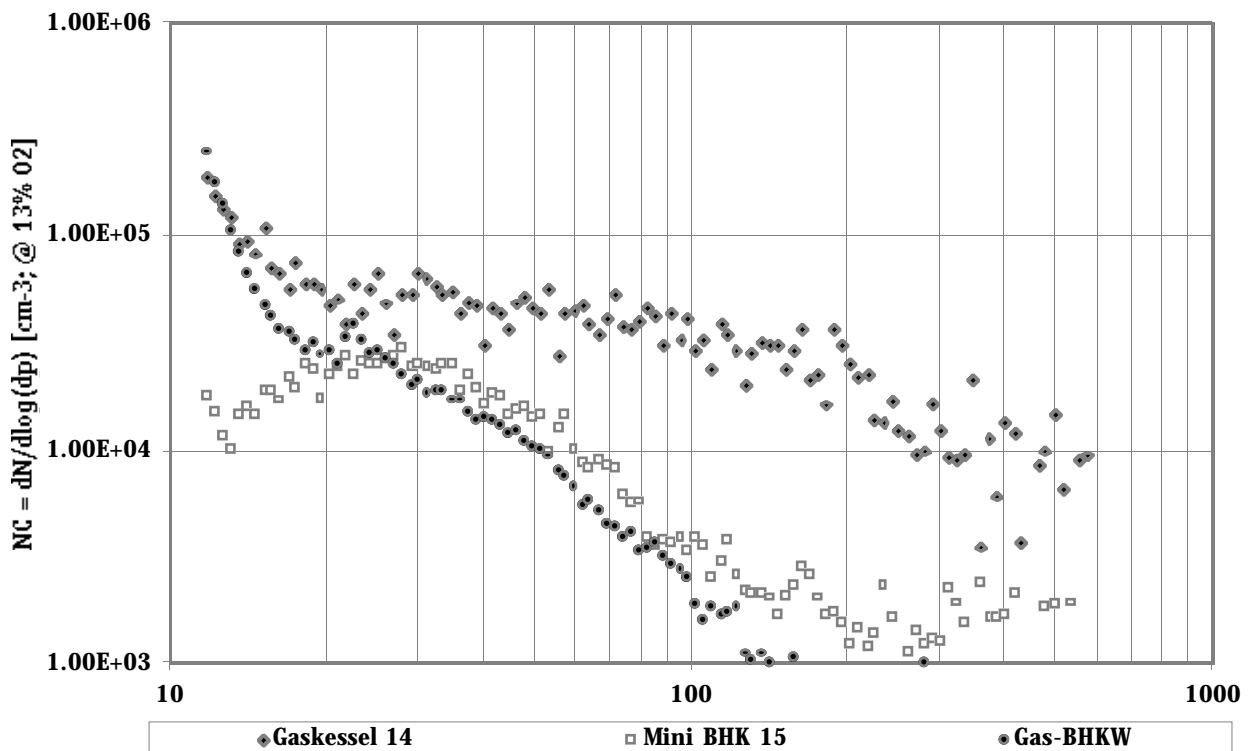


Abbildung 10 Erdgas betriebene Energieanlagen: Partikelgrößenverteilung.

4.7 Zusammenstellung der Emissionsdaten aus der Verbrennung von Holzbrennstoffen

Geringe Gesamtstaub- und Partikelemissionen zeigten die Stückholz- und Pelletkessel. Die Schnitzelfeuerungen bewegten sich im Mittelfeld. Die zum Teil deutlichen Unterschiede von Gesamtstaub und Partikel können auf die Schlepptendenz grösserer Aschepartikel im Brennluft- und Abgasstrom erklärt werden.

Tabelle 8 *Emissionsfaktoren für Gesamtstaub und Partikel der untersuchten Holzfeuerungen*

Feuerungen	Gesamtstaub TSP		Partikel < 600 nm PM0.6		
	Planfilter		SMPS-Partikelmessung		
	Staub- Emissionsfaktor [g/kg]	Emissions- faktor ¹⁾ [mg/MJ]	Emissionsfaktor ²⁾ Partikelmasse [g/kg]	Emissionsfaktor ¹⁾²⁾ Partikelmasse [mg/MJ]	Emissionsfaktor ¹⁾ Partikelanzahl [#/MJ]
Feuerstätten					
Cheminéeöfen	1.1 ± 4.9	68 ± 25	2.8 ± 0.6	161 ± 29	5.4 ± 1.5 * 10 ¹³
Speicheröfen	2.95 ± 0.76	167 ± 44	9.6 ± 5.4	569 ± 309	15.4 ± 6 * 10 ¹³
Stückholzkessel					
Kessel	0.6 ± 0.2	28 ± 11	0.2 ± 0.1	12 ± 6	6.0 ± 1.7 * 10 ¹³
Pelletfeuerungen					
Pelletkessel	0.3 ± 0.02	20 ± 1.2	0.2 ± 0.03	14 ± 2	2.7 ± 0.2 * 10 ¹³
Pelletofen	0.9 ± 0.05	54 ± 3	2.8 ± 1.8	164 ± 105	8.6 ± 2.2 * 10 ¹³
Schnitzelfeuerungen					
Trockenschnitzel	1.6 ± 0.2	94 ± 13	0.8 ± 0.3	45 ± 1	9.2 ± 0.9 * 10 ¹³
Grünschnitzel	0.7 ± 0.1	48 ± 6	0.6 ± 0.2	39 ± 12	4.9 ± 0.5 * 10 ¹³
Restholz	1.1 ± 0.1	64 ± 7	1.0 ± 0.2	59 ± 12	8.2 ± 0.7 * 10 ¹³

¹⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

²⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m_n³

4.8 Zusammenstellung der Emissionsdaten für Anlagen mit fossilen Brennstoffen

Die zum Vergleich durchgeführten Messungen an heizöl- und gasbetriebenen Anlagen zeigen im Vergleich zu den Holzfeuerungen geringe Staub- und Partikelemissionen. Die Emissionen der Gaskessel und Gas-BHKW lagen bei den gewählten Einstellungen des SMPS-Analysegerätes an dessen unterer Nachweisgrenze.

Tabelle 9 *Emissionsfaktoren für Gesamtstaub und Partikel der untersuchten Anlagen mit fossilen Brennstoffen*

Anlagen	Gesamtstaub		Partikel < 600 nm	
	TSP	PM0.6	SMPS-Partikelmessung	
	Planfilter			
	Staub Emissionsfaktor ¹⁾	Emissionsfaktor ^{1) 2)}	Emissionsfaktor ¹⁾	Emissionsfaktor ¹⁾
	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[#/MJ]	[#/MJ]
Öl-Anlagen				
Öl-Kessel (11)	1.5	0.7		2.8 * 10 ¹³
Öl-Kessel (12)	0.6	0.3		1.1 * 10 ¹³
Diesel-BHKW (13)	6.5	0.2		0.01 * 10 ¹³
Gas-Anlagen				
Gaskessel 14	0.3	0		0.002 * 10 ¹³
Mini-BHKW 16	0	0		0.001 * 10 ¹³
BHKW 15	0	0		0.002 * 10 ¹³

¹⁾ bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

²⁾ Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1500 kg/m³

5 Diskussion

5.1 Gesamtstaub vs. PM0.6-Bestimmung mittels SMPS-Analytik

In Abbildung 11 sind die gravimetrischen Gesamtstaubmessungen (TSP) den SMPS-Partikelmessungen bis zu Durchmessern < 600 nm (PM0.6) gegenübergestellt. Während die TSP-Werte direkt aus den Gesamtstaubmessungen hervorgehen, basieren die PM0.6-Werte auf den Partikelmassen, wie sie aus der jeweiligen Partikelverteilung hochgerechnet wurden. Die aufgeführten Mittelwerte und Standardabweichungen zeigen, dass die TSP- mit den PM0.6-Emissionsfaktoren im Allgemeinen recht gut korrespondieren, dies obwohl den Berechnungen für die PM0.6-Massen nur die Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1.5 zu Grunde liegt.

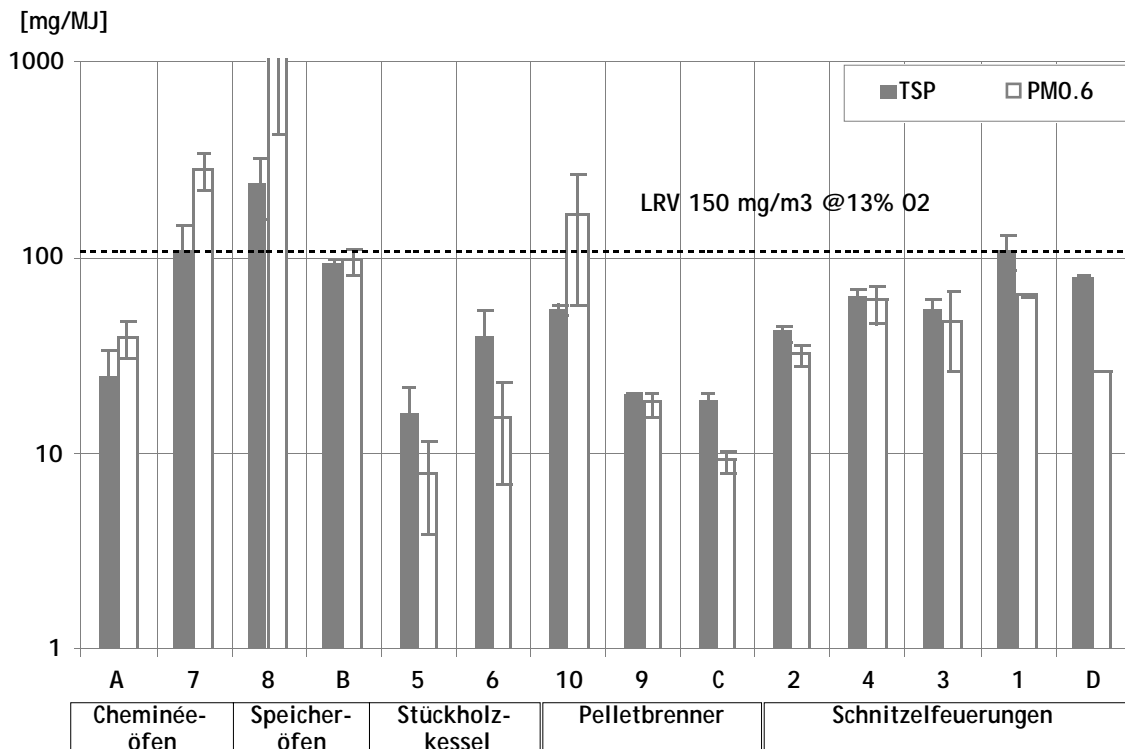


Abbildung 11 Vergleich der Resultate aus den gravimetrischen Gesamtstaubmessungen (TSP) mit den aus der SMPS-Partikelverteilung hochgerechneten Emissionsfaktoren.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass keine klaren Korrelationen bezüglich dem Partikel ausstoß und den Feuerungskategorien auszumachen sind. Jede Feuerungskategorie weist Exponenten mit tiefen Emissionsfaktoren für Gesamtstaub bzw. Partikel auf. Beim maximalen Partikel ausstoß gibt es einen großen Streubereich unter den einzelnen Feuerungskategorien. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die meisten Feuerungen auch unter Praxisbedingungen Gesamtstaubwerte erzielen, die unter den geforderten 150 mg/m^3 (@ 13% Sauerstoff) entsprechend 103 mg/MJ der Luftreinhalte-Verordnung für Holzfeuerungen im Leistungsbereich zwischen 70 kW und 1 MW liegen.

5.1.1 Korrelation der TSP- und PM0.6-Messmethode

Abbildung 12 zeigt, dass die Gesamtstaub- und Partikelemissionsfaktoren erstaunlich gut korreliert scheinen. Die PM0.6-Emissionsfaktoren liegen in der Tendenz etwas unter denjenigen des Gesamtstaubes, es lassen sich aber auch systembedingte Unterschiede erkennen:

Bei den automatischen Holzfeuerungen zeigte sich eine generelle Unterschätzung der PM0.6-Werte. Die vergleichsweise höheren TSP-Werte lassen sich auf zusätzliche Aschenfrachten zurückführen, die aus mitgeschleppten Aschepartikeln des stark mit Verbrennungsluft durchströmten Rostbereichs stammen können. Dies würde auch die auf den Flachfiltern beobachteten grösseren Partikel von heller Farbe erklären.

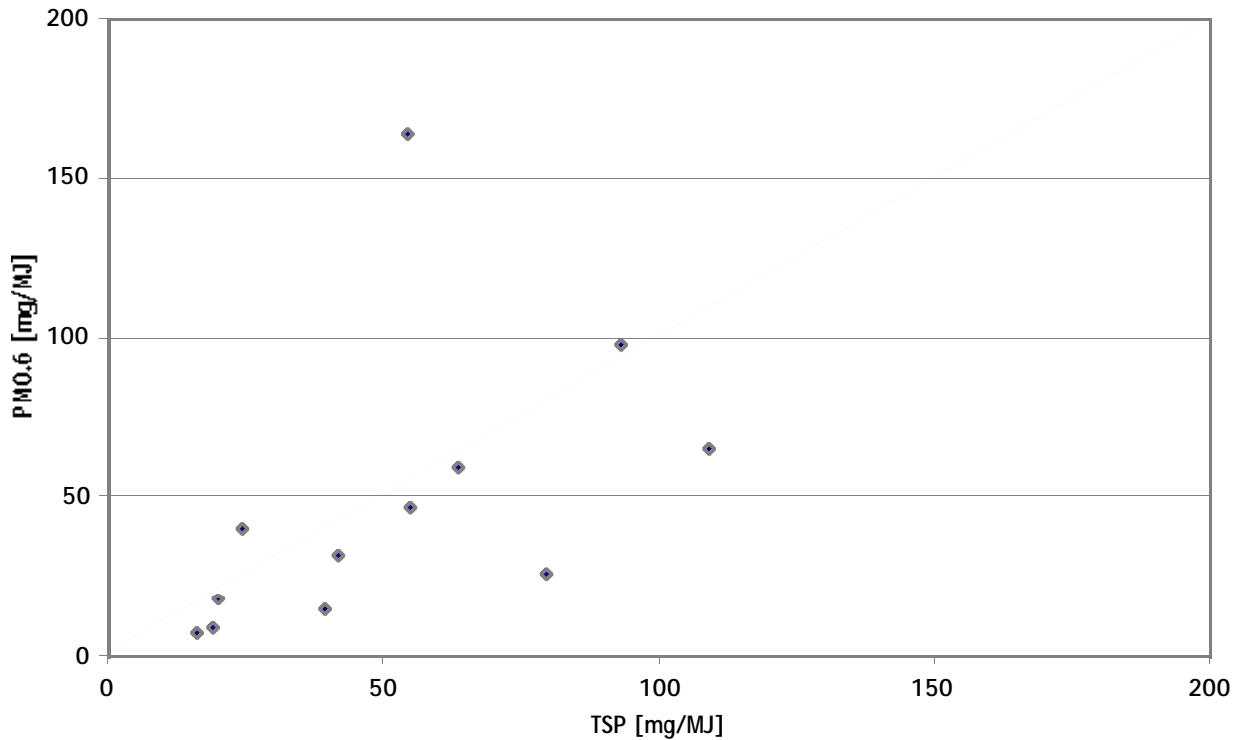


Abbildung 12 Korrelation der Emissionsfaktoren für Staub (TSP) und Partikel (PM0.6).

Im Kontrast dazu zeigte sich bei Systemen mit instabiler Verbrennung eine regelmässige Überschätzung der PM0.6-Werte. Die typischerweise flacheren Partikel-Grössenverteilungsmuster entstehen, wenn kurzfristig während eines Scanvorganges die Anzahlkonzentration stark ansteigt und damit in den Bereichen mit normalerweise geringeren Anzahlkonzentrationen ein überproportionaler Partikelanteil gemessen wird. Diesem Effekt könnte mit deutlich längeren Scanzeiten und mehrmaligen Wiederholungen begegnet werden. Die unter Umständen überproportional gemessenen grösseren Partikel schlagen bei der Hochrechnung der Massenanteile deutlich zu Buche, da deren Volumina kubisch zum Durchmesser in die Rechnung eingehen. Diesem messtechnischen Fehler kann mathematisch begegnet werden, wenn an Stelle der angenommenen konstanten Dichte von 1.5 eine zum Partikeldurchmesser umgekehrt proportionale Dichte angenommen wird. Tabelle 10 zeigt vergleichsweise die Emissionsfaktoren für solche instabile Systeme, wenn die Dichte für Partikel von 10 bis 500 nm linear von 1.5 auf 0.4 verringert wird. Aus Rücksicht zur Konstanz der SMPS-Einstellungsparameter für alle untersuchten Feuerungssysteme wurde auf beide Korrekturmaassnahmen verzichtet.

Tabelle 10 **PM0.6 Emissionsfaktoren variabler Kohlenstoff-Dichtewerte**

Feuerung	Gesamtstaub		Partikel PM 0.6	
	Kohlenmonoxid	Emissionsfaktor Staub	Emissionsfaktor ^{2) 3)}	Emissionsfaktor ^{2) 3)} mit variierender Kohlenstoffdichte
	mg/m ³	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Cheminéeofen (7)	4646	111	283	177
Speicherofen (8)	2835	241	1040	509
Pelletfeuerung (10)	357	54	164	117

Bei den Messungen, die höhere PM0.6- als TSP-Werte aufwiesen, waren neben einer schwarzen Einfärbung grosse Kohlenstoffpartikel auf den Flachfiltern zu beobachten.

Die maximale Abweichung zwischen den TSP- und PM0.6-Emissionsfaktoren reduzierte sich bei diesen Systemen mit den oben erwähnten, Durchmesser-korrelierten Dichtewerten von einem Faktor 1.3 auf 1.16 bei einer Standardabweichung von 37%.

5.2 Partikelgrößenverteilung

5.2.1 Partikelverteilung der verschiedenen Holzfeuerungen

In Abbildung 13 sind die Partikelverteilungskurven verschiedener Holzfeuerungen als Mittelwerte von mehreren SMPS-Messungen dargestellt. Während die Partikelverteilung bei den Schnitzel-, Pellet- und Stückholzkesseln eher geringen Schwankungen unterliegt, ändert sich die Partikelverteilung bei den Holz-Feuerstätten in den verschiedenen Phasen des Chargenabbrandes recht markant.

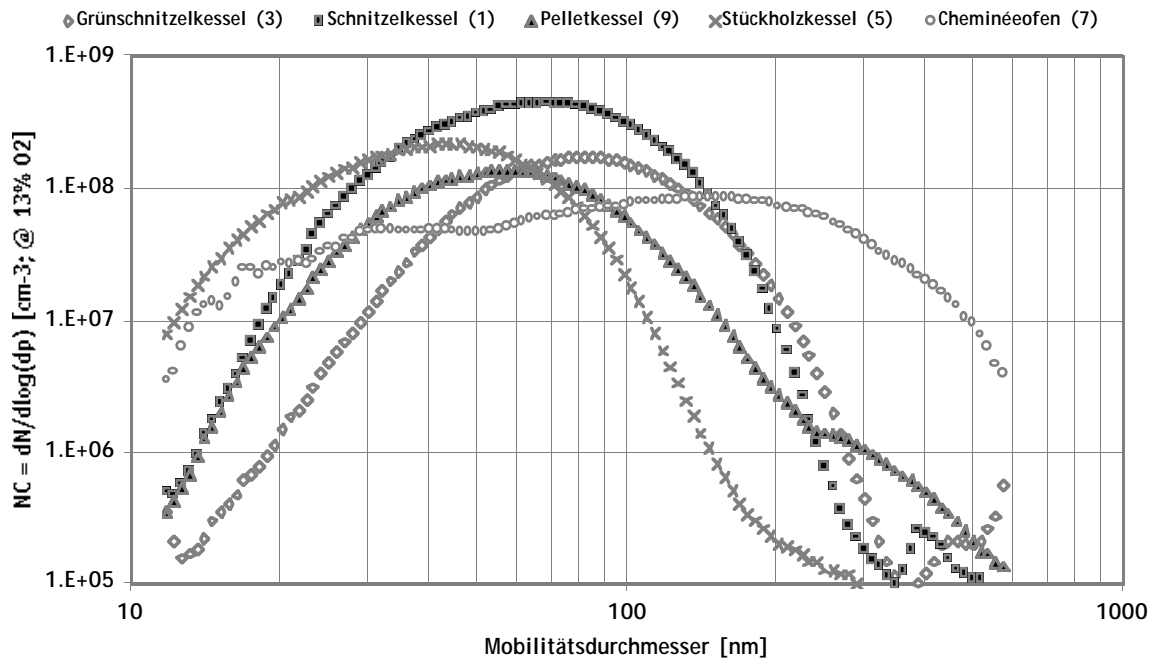


Abbildung 13 Partikelverteilungskurven verschiedener Holzfeuerungstypen.

Bei den automatisch beschickten Feuerungen liegt die Partikelgrößenverteilung allgemein symmetrisch zum MODE-Durchmesser. Der Stückholzkessel zeigte hingegen eine deutlich erhöhte Anzahl feinsten Partikel mit $dp < 30$ nm. Beim Cheminéeofen wurde wegen der oben erwähnten unstillen Verbrennungsphasen eine flache Verteilung der gemittelten Anzahlkonzentrationen gemessen.

5.2.2 MODE-Durchmesser

In Tabelle 11 sind die Mobilitätsdurchmesser mit den höchsten Partikelkonzentrationen (MODE-Durchmesser) der verschiedenen Feuerungen dargestellt. Sie liegen typischerweise im Bereich zwischen 40 und 80 nm.

Tabelle 11 **MODE-Durchmesser**

Bezeichnung	Typ	MODE
Holzfeuerungen		
A	Cheminéeofen	55
B	Speicherofen (Specksteinofen)	20 - 117
C	Pelletkessel	88
D	Unterschub-Schnitzelfeuerung	72
1	Unterschub-Schnitzelfeuerung	66
2	Schieberost-Schnitzelfeuerung	85
3	Schieberost-Schnitzelfeuerung	81
4	Vorofen-Restholzfeuerung	71
5	Stückholzkessel	43
6	Stückholzkessel	51
7	Cheminéeofen	102
8	Speicherofen (Kachelofen)	63
9	Pelletkessel	55
10	Pelletofen	52
Anlagen mit fossilen Brennstoffen		
11	Öl-/Gas-Kombikessel	19
12	Öl-/Gas-Kombikessel	28
13	Diesel-Blockheizkraftwerk	72
14	Gaskessel	12
15	Mini-Gas-Blockheizkraftwerk	28
16	Gas-Blockheizkraftwerk	12

Die kleinsten MODE-Durchmesser wiesen die Pellet- und die Stückholzkessel auf. Die Schnitzelfeuerungen lagen etwas darüber. Infolge der stark variierenden Partikelverteilung bei Feuerstätten erreichten die MODE-Durchmesser in den Startphasen Werte bis 200 nm.

5.2.3 Staubfrachten der einzelnen Partikelfraktionen

Die Staubfrachten der einzelnen Partikelklassen am exemplarischen Beispiel eines Cheminéeofens zeigen, dass die Gesamtfracht vor allem aus den Partikelfraktionen < 400 nm stammte. In Abbildung 14 sind die fraktionierten Partikelfrachten über den Bereich von 10 nm bis 20 μ m dargestellt. Bis 370 nm entstammen die Daten der SMPS-Messung, über 370 nm dem laseroptischen Aerosolspektro-

meter, LOAS. Die abnehmende Anzahl der Partikel > 300 nm trägt bei der Aufsummierung der Frachten bis 20 µm nur noch wenig zur Partikelmasse bei.

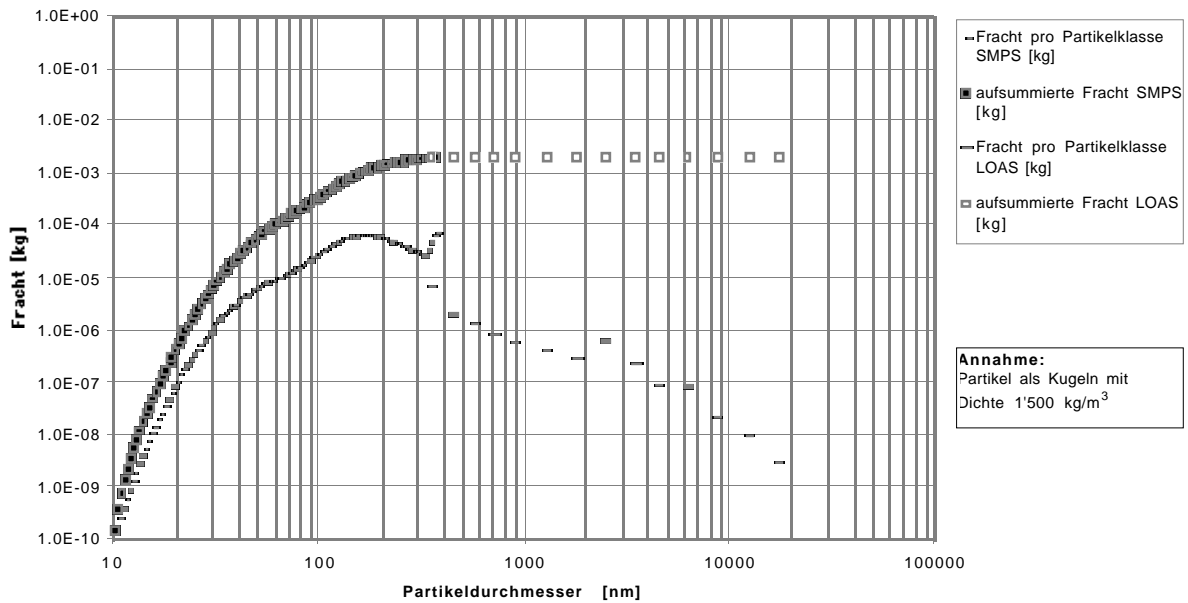


Abbildung 14 Fraktionierte Partikelfrachten am Beispiel des Cheminéeofens (A).

Entsprechend verläuft die Fracht-Summenkurve ab 300 nm asymptotisch. Die Partikeldichte ist sowohl bei den SMPS- wie den LOAS-Daten mit einem konstanten Wert von 1'500 kg/m³ und einer Kugelgeometrie berechnet.

In der Tendenz liegt bei den untersuchten Holzfeuerungen der Anteil der Feinpartikel mit Mobilitätswert $d_p < 300$ nm über 90% bezogen auf die PM_{0.6}-Partikelmasse (Abbildung 15).

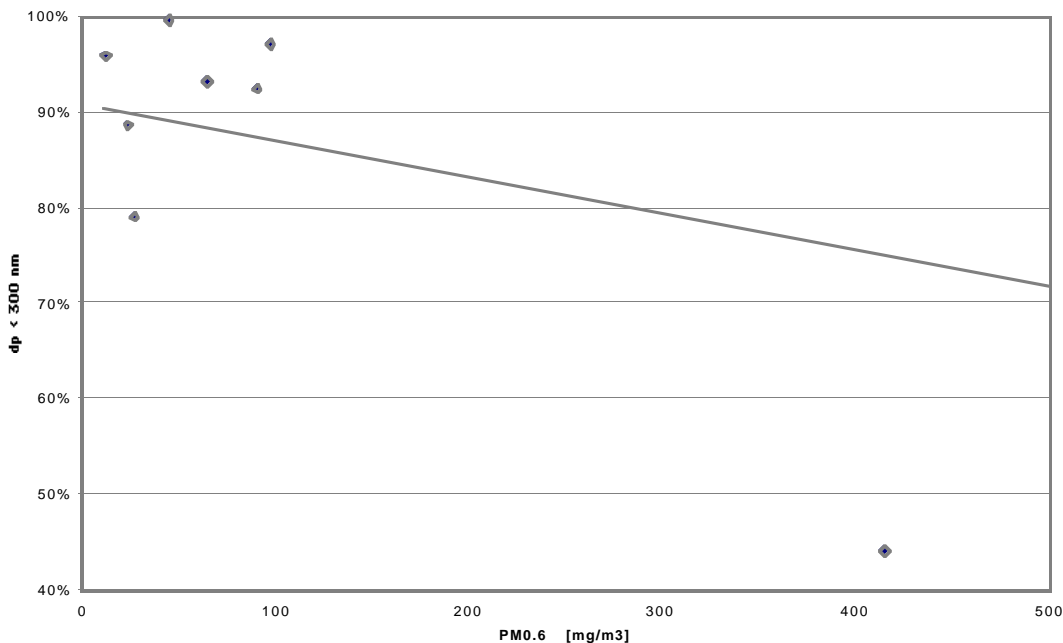


Abbildung 15 Anteil der Partikel mit Durchmessern $d_p < 300$ nm an der gesamten PM_{0.6}-Partikelmasse.

Einen höheren Anteil an Partikeln zwischen 300 nm und 600 nm haben Cheminée- und Speicheröfen.

5.3 Partikelemissionsfaktoren

5.3.1 Gesamtstaub und Partikelanzahl

In der Gegenüberstellung von TSP- und SMPS-Emissionsfaktoren lässt sich eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Werte feststellen (Abbildung 16). Bei einzelnen Feuerungen finden sich aber auch deutliche Abweichungen.

Feuerungen, die Verbrennungspartikel mit kleinen MODE-Werten haben, weisen eine geringe Partikelmasse auf. Aus physiologischer Sicht hat, neben der gesamten Partikelmasse, die Anzahl und Verteilung eine besondere Bedeutung. Die Ergänzung der TSP-Werte mit dem auf der *Partikelanzahl* basierenden Emissionsfaktor sowie der Partikelverteilung liefern wertvolle Informationen zur Beurteilung partikulärer Schadstoffquellen.

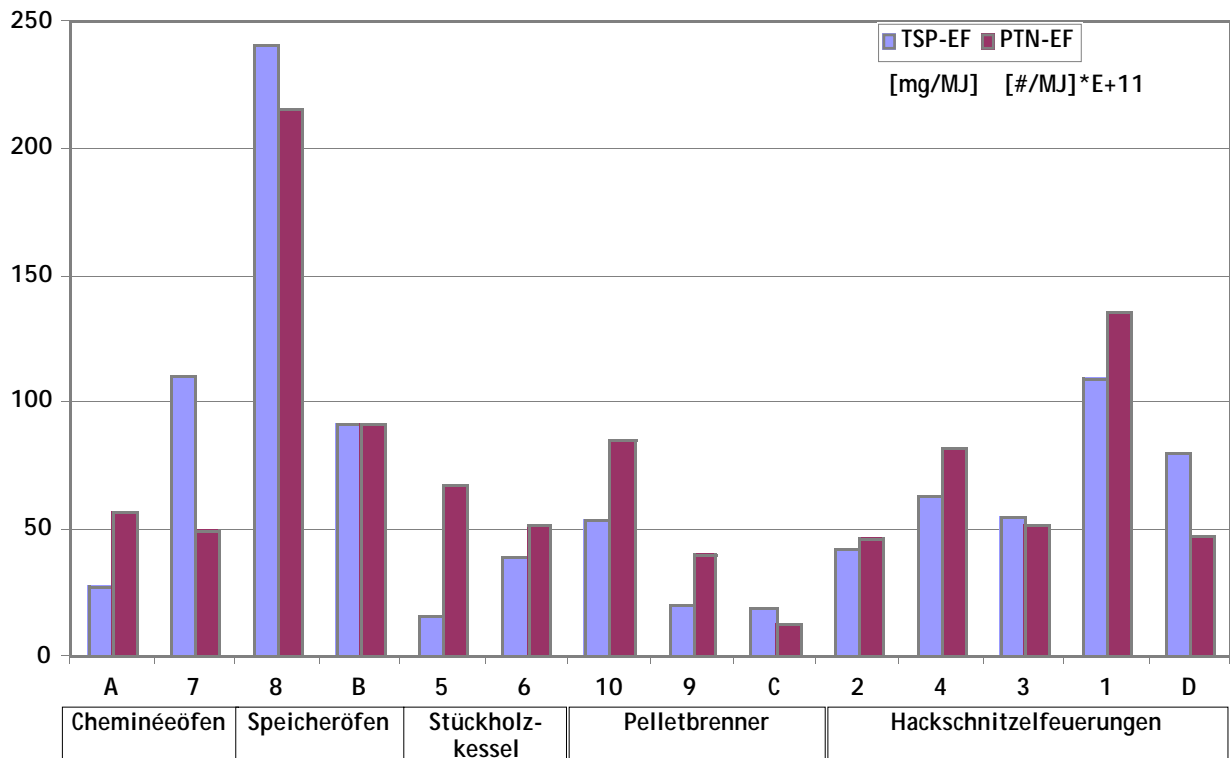


Abbildung 16 Vergleich der Emissionsfaktoren aus gravimetrisch bestimmtem Gesamtstaub (TSP-EF) und aus dem SMPS-Verteilungsmuster (PTN-EF).

5.3.2 Einfluss des Betriebszustandes auf die Partikelemissionen

Bei den automatisch beschickten Grünschnitzelfeuerungen sind die Emissionsfaktoren für den Ein-Aus-Betrieb, Gluthaltung und Vollastbetrieb gemessen worden. Der Ein- und Ausbetrieb weist einen ca. 1.5-fach höheren Partikelauwurf auf als der Vollastbetrieb (Abbildung 17).

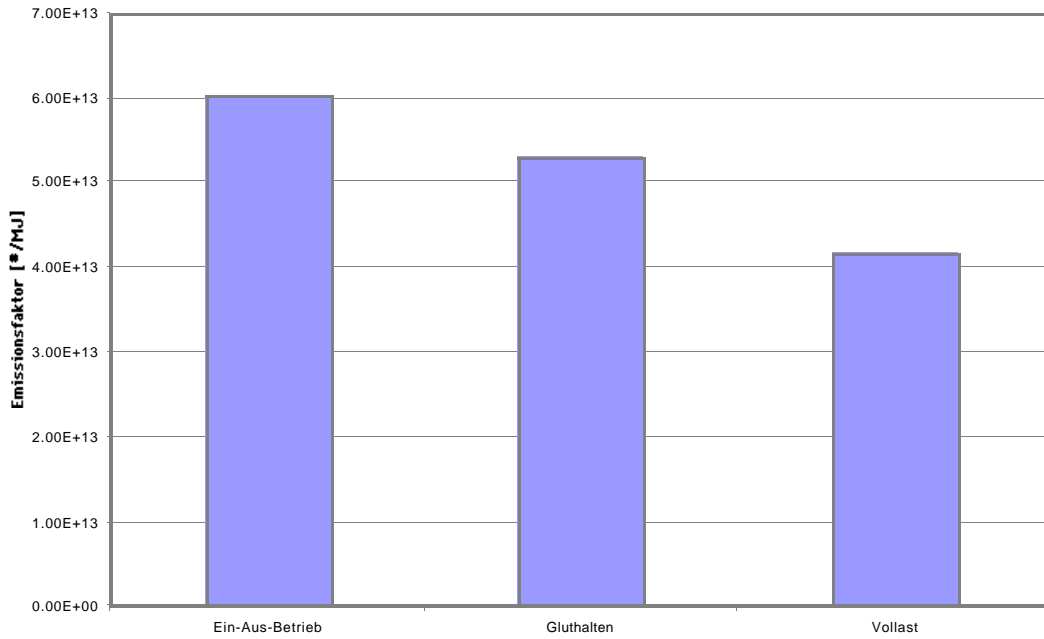


Abbildung 17 Einfluss der Betriebszustände auf die Partikelemissionen.

5.3.3 Vergleich der biogen und fossil betriebenen Anlagen

Bei den Anlagen mit fossilen Brennstoffen liegen die Partikelemissionen deutlich unter den Werten der Holzfeuerungen (Abbildung 18).

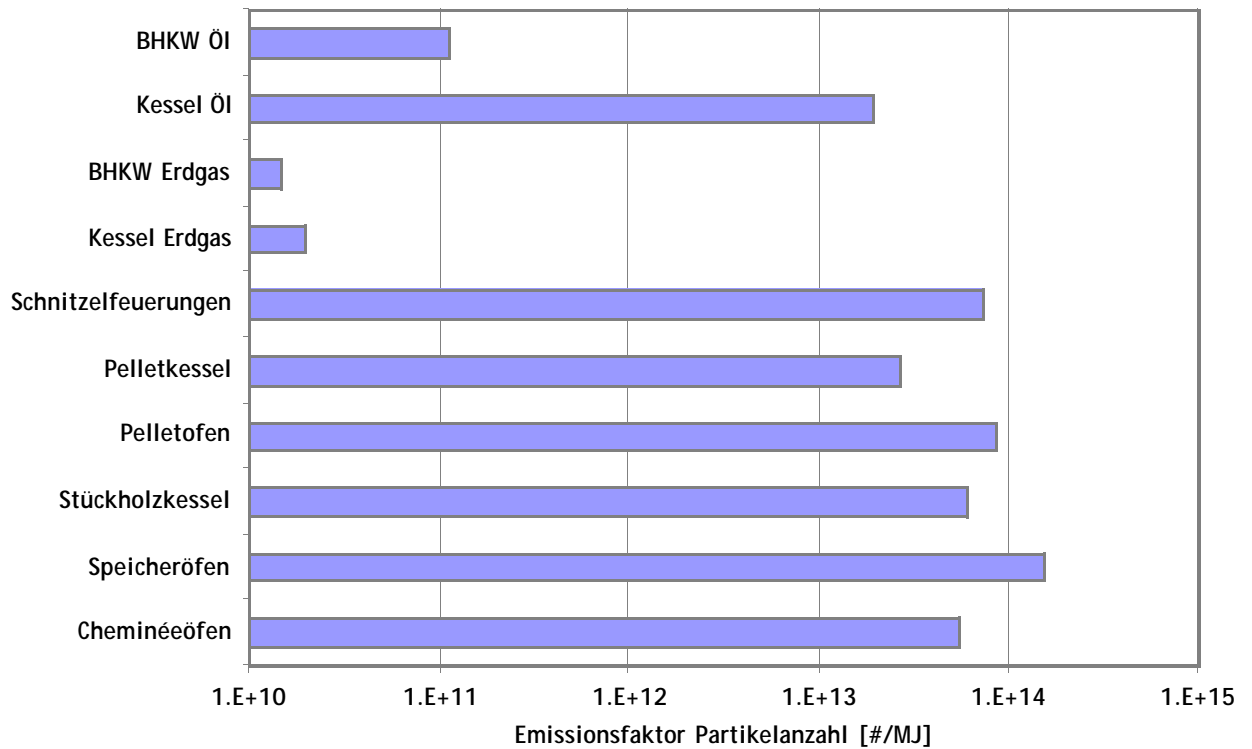


Abbildung 18 Emissionsfaktoren für Partikelzahl < 600 nm von Holzfeuerungen und fossil betriebenen Anlagen.

6 Schlussfolgerungen

- Mit den ermittelten Partikelemissionsfaktoren von Holzfeuerungen in dem für Verbrennungsaerosole typischen Bereich bis 600 nm lassen sich Kataster für die Quellenbelastung an Feinpartikeln (Durchmesser < 10 µm, PM10) für eine vorgegebene Population verschiedener Holzfeuerungen erstellen.
- Die mit der SMPS-Messtechnik erhobenen Daten aus Praxisanlagen liefern neben den Emissionsfaktoren zusätzlich Aussagen über Grössenverteilungen und Anzahlkonzentrationen der Verbrennungspartikel im physiologisch relevanten Grössenbereich bis 600 nm (PM0.6).
- Aus der Partikel-Anzahlverteilung lassen sich unter Annahme von Partikeldichte und -geometrie die auf Masse bezogenen PM0.6-Partikelemissionsfaktoren hochrechnen.
- Die berechneten Partikelmassen erlauben eine Abschätzung der Frachtanteile der einzelnen Partikelfraktionen unter 600 nm. Bei den untersuchten Chargenfeuerungen verflachen die Summenkurven der fraktionierten Partikelfrachten ab 300 nm Mobilitätsdurchmesser, bei den automatischen Feuerungen bereits ab 200 nm.
- Bei Feuerungen mit einer guten Verbrennung stammen über 90% der Partikelfracht aus den Partikelfraktionen mit $d_p < 300$ nm.
- Die parallel zur Partikelanalytik gravimetrisch erhobenen Gesamtstaubwerte (total suspended particles, TSP) korrespondieren im Allgemeinen mit den gerechneten PM0.6-Werten. Die Abweichungen der TSP- und PM0.6 Emissionsfaktoren sind gering, wenn die Verbrennung gut ist und keine Schleppwirkung für Ascheteilchen im Glutbett besteht. Die Standardabweichung betrug $\pm 37\%$. Rechnet man anstelle konstanter Partikeldichte mit einer zum Durchmesser umgekehrt proportionalen Dichte, reduziert sich die mittlere maximale Abweichung von einem Faktor 1.3 auf 1.16.
- Die untersuchten Holzfeuerungen weisen ihre maximale Partikel-Anzahlkonzentrationen bei Durchmessern (most frequent diameter, MODE) zwischen 50 nm und 200 nm auf.
- In allen Kategorien liessen sich Feuerungen mit geringen Partikelemissionen ausmachen. Die minimalen Emissionsfaktoren variieren in sämtlichen untersuchten Holzfeuerungskategorien zwischen 2.5 und 9.4 E+13 #/MJ. Die maximalen Emissionsfaktoren streuen in den einzelnen Feuerungskategorien erheblich.
- Bei den handbeschickten Cheminée- und Speicheröfen liegt der MODE-Durchmessers bei 100 nm. Die Chargenfeuerungen ändern die Partikelgrössenverteilung während des Abbrandes deutlich. Anfänglich emittieren die Feuerungen Partikel > 100 nm, gegen den Ausbrand hin sind sie < 50 nm.
- Bei automatischen Feuerungen variiert die Partikelgrössenverteilung nur geringfügig, wenn die Betriebsparameter nicht markant ändern. Die Partikelemissionen hängen von feuerungstech-

nischen Parametern wie z.B. Brennraumbelastung und Luftüberschuss ab. Die grössten Partikel-Anzahlkonzentrationen finden sich bei Mobilitätsdurchmessern von 80 nm.

- Unregelmässig brennende Feuerungssysteme emittieren erhöhte Partikel-Anzahlkonzentrationen sowohl im unteren wie im oberen Grössenbereich. Dies zeigt sich im flachen Verlauf der Partikel-Grössenverteilungskurve. Die Grössenverteilungskurve von Feuerungen mit einer konstanten Verbrennung verlaufen glockenförmig um einen ausgeprägten MODE-Durchmesser.
- Die zum Vergleich erhobenen Partikelemissionsfaktoren der Energieanlagen mit fossilen Brennstoffen liegen im Durchschnitt um den Faktor 16 tiefer als die Werte der Holzfeuerungen.
- Zur Beurteilung der physiologischen und damit zur lufthygienischen Relevanz von Feinpartikeln sind weitere Informationen zur Zusammensetzung, Struktur und Dichte der Partikel sowie zur Beladung derer Oberflächen mit Verbrennungsprodukten von zentraler Bedeutung. Daten und Informationen zur Partikelmorphologie und -chemie fehlen noch weitgehend.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden von den folgenden Stellen gefördert:

- Bundesamt für Wald, Landschaft und Umwelt (BUWAL), Bern
- Bundesamt für Energie (BEW), Bern
- Lufthygieneämter der Kantone Aargau, Baselland/Baselstadt, Bern, Luzern und Solothurn

Wir möchten uns für die Förderung und die kooperative Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

- /1/ BUWAL (2001), Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen, Umwelt-Materialien Nr. 136, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- /2/ BUWAL (1995), Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010, Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- /3/ Cercle d'Air-Fachtagung "Massnahmenpläne 99", 12.11.1998
- /4/ Wieser, U., Gaegauf, Ch. (2000), Entwicklung und Test eines Messverfahrens für ambulante Erfassung der Partikelfrachten in Holzfeuerungsabgasen, Ökozentrum Langenbruck, CH-4438 Langenbruck
- /5/ ISO/DIS 13336, Draft International Standard (DIS), Solid fuel burning appliances - Test method for determining power output, efficiency and flue gas emissions, International Organization for Standardization (1997)
- /6/ BUWAL (1996), Messempfehlung
- /7/ US/EPA-Messmethoden der Kategorie A (Method 5 – Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources, Method 5G – Determination of Particulate Emissions from Wood Heaters from a Dilution Tunnel Sampling Location, Method 5H – Determination of Particulate Emissions from Wood Heaters from a Stack Sampling Location

Anhang

Daten der untersuchten Anlagen

Liste der untersuchten Anlagen

Bezeichnung	Typ	Brennstoff	Messort
Holzfeuerungen			
<i>Projektphase 1</i>			
A	Cheminéeofen	Stückholz	Labor
B	Speicherofen (Specksteinofen)	Stückholz	Labor
C	Pelletkessel	Pellet	Labor
D	Unterschub-Schnitzelfeuerung	Trockenschnitzel	In situ
<i>Projektphase 2</i>			
1	Unterschub-Schnitzelfeuerung	Trockenschnitzel	In situ
2	Schieberost-Grünschnitzelfeuerung	Grünschnitzel	In situ
3	Schieberost-Grünschnitzelfeuerung	Grünschnitzel	In situ
4	Vorofen-Restholzfeuerung	Restholz	In situ
5	Stückholzkessel	Stückholz	In situ
6	Stückholzkessel	Stückholz	In situ
7	Cheminéeofen	Stückholz	Labor
8	Speicherofen (Kachelofen)	Stückholz	Labor
9	Pelletkessel	Pellet	In situ
10	Pelletofen	Pellet	Labor
Anlagen mit fossilen Brennstoffen			
11	Öl-/Gas-Kombikessel	Heizöl EL	In situ
12	Öl-/Gas-Kombikessel	Heizöl EL	In situ
13	Diesel-Blockheizkraftwerk	Heizöl EL	In situ
14	Gaskessel	Erdgas	In situ
15	Mini-Gas-Blockheizkraftwerk	Erdgas	In situ
16	Gas-Blockheizkraftwerk	Erdgas	In situ

Daten