

Jahresbericht 2001, 15. Dezember 2001

Projekt Partikelemissionen aus Holzfeuerungen

Autor und Koautoren	Christian Gaegauf, Ueli Wieser, Yves Macquat	
beauftragte Institution	Ökozentrum Langenbruck	
Adresse	CH-4438 Langenbruck	
Telefon, E-mail, Internet- adresse	+41(0)62 390 31 26 gaegauf@oekozentrum.ch	www.oekozentrum.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	37506/77564	
Dauer des Projekts (von – bis)	29.6.2000 bis 31.5.2001	

ZUSAMMENFASSUNG

Partikel gelten als wichtiger Luftbelastungsfaktor. In der Schweiz stammen ca. 44 % der Partikelemissionen im Mikron- und Submikronbereich (Partikeldurchmesser < 10 µm) vom Verkehr, 31 % aus der Industrie, 21 % aus Forst- und Landwirtschaft und 4 % aus den Haushalten. Aus lufthygienischer Sicht sind die Partikelfrachten aus Feststofffeuerungen und hier vor allem aus Holzfeuerungen von Interesse.

Um eine Aussage über den Feinpartikelaustritt machen zu können, wurden die Partikelemissionen von 14 verschiedenen Holzfeuerungsanlagen unter Praxisbedingungen gemessen. Bei Feuerungen mit einer guten Verbrennung stammen über 90% der Partikelfracht aus den Partikelfraktionen mit Mobilitätsdurchmessern unter 300 nm. Bei Holzfeuerstätten variiert die Partikelgrößenverteilung während des Abbrandes, bei automatischen Holzfeuerungen verändert sie sich kaum. In allen Feuerungskategorien lassen sich Feuerungen mit geringen Partikelemissionen ausmachen. Das Minimum der Partikelemissionsfaktoren bewegt sich dabei im Verhältnis von 1 : 3.8 während dem die Maxima der einzelnen Feuerungskategorien erheblich streuen. Die untersuchten Holzfeuerungen weisen ihre maximale Partikel-Anzahlkonzentrationen bei Durchmessern zwischen 50 nm und 200 nm auf. Die parallel zur Partikelanalytik gravimetrisch erhobenen Gesamtstaubwerte korrespondieren mit den gerechneten Feinstaubfrachten, wenn die Verbrennung gut ist und keine Schleppeffekte für Ascheteilchen im Glutbett besteht. Die zum Vergleich erhobenen Partikelemissionsfaktoren von Energieanlagen (Kessel und Wärme-Kraftkopplungsanlagen) mit fossilen Brennstoffen liegen im Durchschnitt um den Faktor 16 tiefer als die Werte der Holzfeuerungen.

Projektziele

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 für eine gegebene Population von Holzfeuerungen Hochrechnungen zu ihren Quellenanteilen an Feinpartikeln erstellt werden können.

Um die Kenntnisse über den Partikelaustritt 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.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

MESSANALYTIK

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 (Abbildung 1), das in der zweiten Projektphase bei den Felduntersuchungen der verschiedenen Anlagen seinen Einsatz fand.

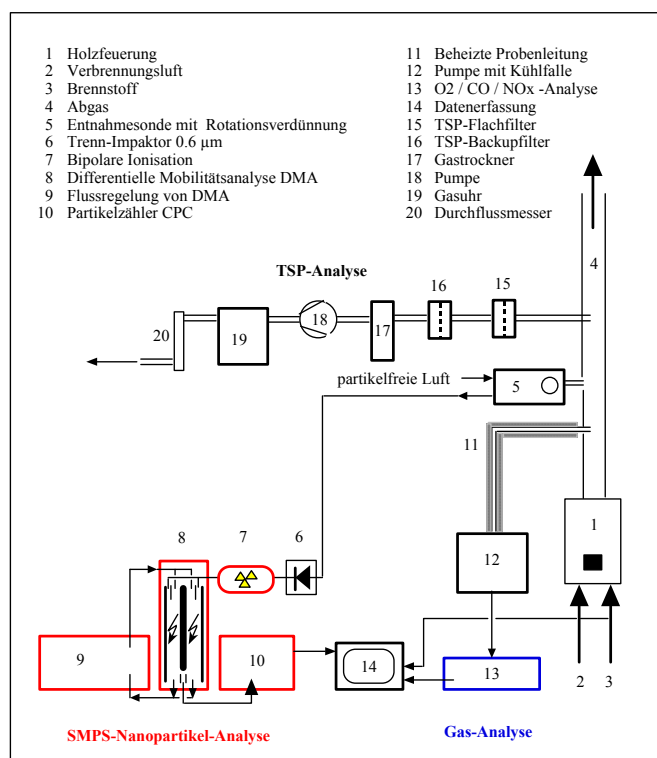


Abbildung 1 Messaufbau in der Feldmesskampagne zur Bestimmung von Gesamtstaub, Partikeln und gasförmigen Emissionen in den Abgasen.

Mit einer SMPS-Messausrüstung (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI, 3936 Series) wurden die Partikelkonzentrationen in 64 Grössenklassen mit Mobilitätsdurchmessern zwischen 12 bis 572 nm bestimmt. Ein mechanischer Impaktor separierte die groben Staubpartikel über 650 nm. Die Partikel im Probegas wurden mit einer radioaktiven Quelle bipolar ionisiert und im DMA (Differential Mobility Analyzer, TSI 3080) auf Grund eines variablen elektrischen Feldes nach ihrer Mobilität selektioniert. Zum 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 Mobilität 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 2¹/₂ Minuten gewählt worden.

Parallel zur Feinpartikelmessung erfolgte die gravimetrische Gesamtstaubmessung mit Planfilter und Backup-Filter als gängige Methode zur lufthygienischen Charakterisierung und Kontrolle der Holzfeuerungen. Die Abgasentnahme erfolgte über eine Absaugsonde mit einem 90° gekrümmten Chromstahlrohr. Auswechselbare Absaugdüsen mit unterschiedlichen Durchmessern erlaubten die isokinetische Probenahme für das erforderliche Absaugvolumen.

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 (2 Cheminéeöfen, 1 Kachelofen und 1 Specksteinofen)
- Stückholzkessel (2)
- Pelletfeuerungen (1 Kessel und 1 Zimmeröfen)
- Schnitzelfeuerungen (2 Unterschubfeuerungen, 2 Schieberostfeuerungen, 1 Vorofenfeuerung)

Zu Vergleichszwecken gelangten fossil befeuerte Anlagen (Kessel und Wärme-Kraftkopplungsanlagen) 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.

MESSRESULTATE

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 einer angenommenen Partikelgeometrie und Partikeldichte basiert. Für die Partikelform wurde eine kugelförmige Geometrie, für die Partikeldichte ein konstanter Wert von 1500 kg/m³ angenommen.

Die Darstellung der Partikelverteilung erfolgte nach der in der Aerosolmesstechnik üblichen Weise. Der Durchmesser der Partikel (d_p), 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 ($d\log(d_p)$), wobei (d_p) dem Mobilitätsdurchmesser der Partikel entspricht.

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. Abweichungen zwischen Gesamtstaub und Partikel liegen auch bei Feuerungen mit zeitweise schlechter Verbrennung vor. Dies ist auf die ungleiche Gewichtung der Feinpartikelskans in Phasen schlechter Verbrennung zurückzuführen.

Tabelle 1 *Emissionsfaktoren für Gesamtstaub und Partikel der untersuchten Holzfeuerungen*

Feuerungstyp	Gesamtstaub TSP		Partikel < 600 nm PM0.6		
	Planfilter		SMPS-Partikelmessung		
	Staub- Emissionsfaktor	Emissions- faktor ¹⁾	Emissions- faktor ²⁾ Partikelmasse	Emissions- faktor ¹⁾²⁾ Partikelmasse	Emissionsfaktor ¹⁾ Partikelanzahl
	[g/kg]	[mg/MJ]	[g/kg]	[mg/MJ]	[/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/m³

In Abbildung 2 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 lediglich die Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1.5 zu Grunde liegt.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass keine klaren Korrelationen bezüglich dem Partikelaustritt und den Feuerungskategorien auszumachen sind. Jede Feuerungskategorie weist Exponenten mit tiefen Emissionsfaktoren für Gesamtstaub bzw. Partikel auf. Beim maximalen Partikelaustritt gibt es einen grossen Streubereich unter den einzelnen Feuerungskategorien. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die meisten Feuerungen auch unter Praxisbedingungen Gesamtstaubwerte erzielen, die unter den geforderten 150 mg/m³ (@ 13% Sauerstoff, entsprechend 103 mg/MJ der Luftreinhalte-Verordnung für Holzfeuerungen im Leistungsbereich 70 kW bis 1 MW) liegen.

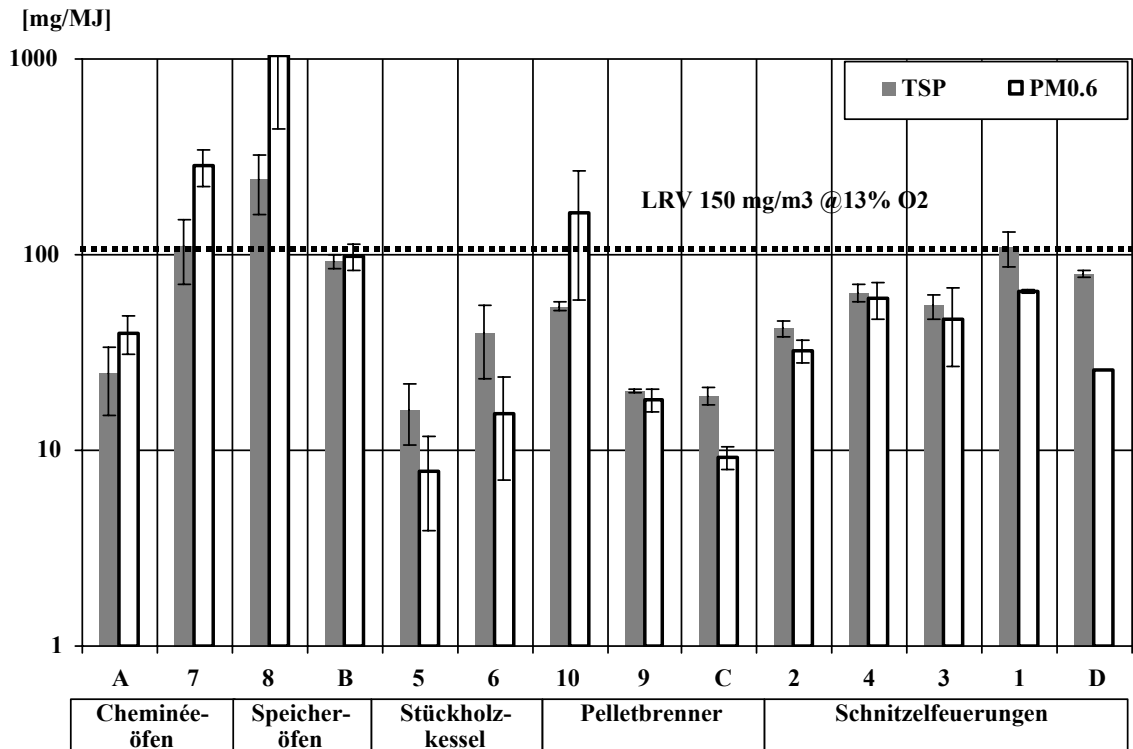


Abbildung 2 Vergleich der Resultate aus den gravimetrischen Gesamtstaubmessungen (TSP) mit den aus der SMPS-Partikelverteilung hochgerechneten Emissionsfaktoren.

In Abbildung 3 sind die Partikelverteilungskurven verschiedener Holzfeuerungen als Mittelwerte von mehreren SMPS-Messungen dargestellt.

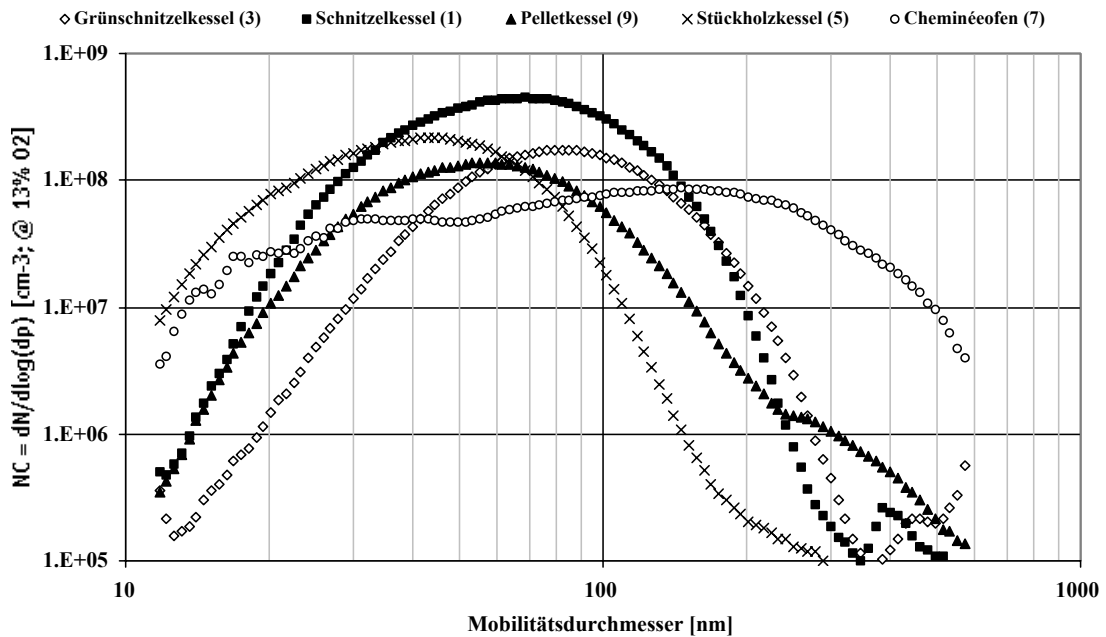


Abbildung 3 Partikelgrößenverteilungskurven verschiedener Holzfeuerungstypen.

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.

In der ersten Projektphase wurden die Staubfrachten der einzelnen Partikelklassen in einem erweiterten Grössenbereich von 10 nm bis 20 µm am exemplarischen Beispiel eines Cheminéeofens erhoben. Dabei zeigte es sich, dass die Gesamtfracht vor allem aus den Partikelfractionen < 400 nm stammte. Bis 370 nm entstammen die Daten der SMPS-Messung, über 370 nm einem laseroptischen Aerosolspektrometer, LOAS (Grimm, DustMonitor 1.108). Die deutlich sinkende Anzahl der Partikel > 300 nm trägt bei der Aufsummierung der Frachten bis 20 µm nur noch wenig zur Partikelmasse bei.

Bei den Anlagen mit fossilen Brennstoffen liegen die Partikelemissionen deutlich unter den Werten der Holzfeuerungen (Abbildung 4).

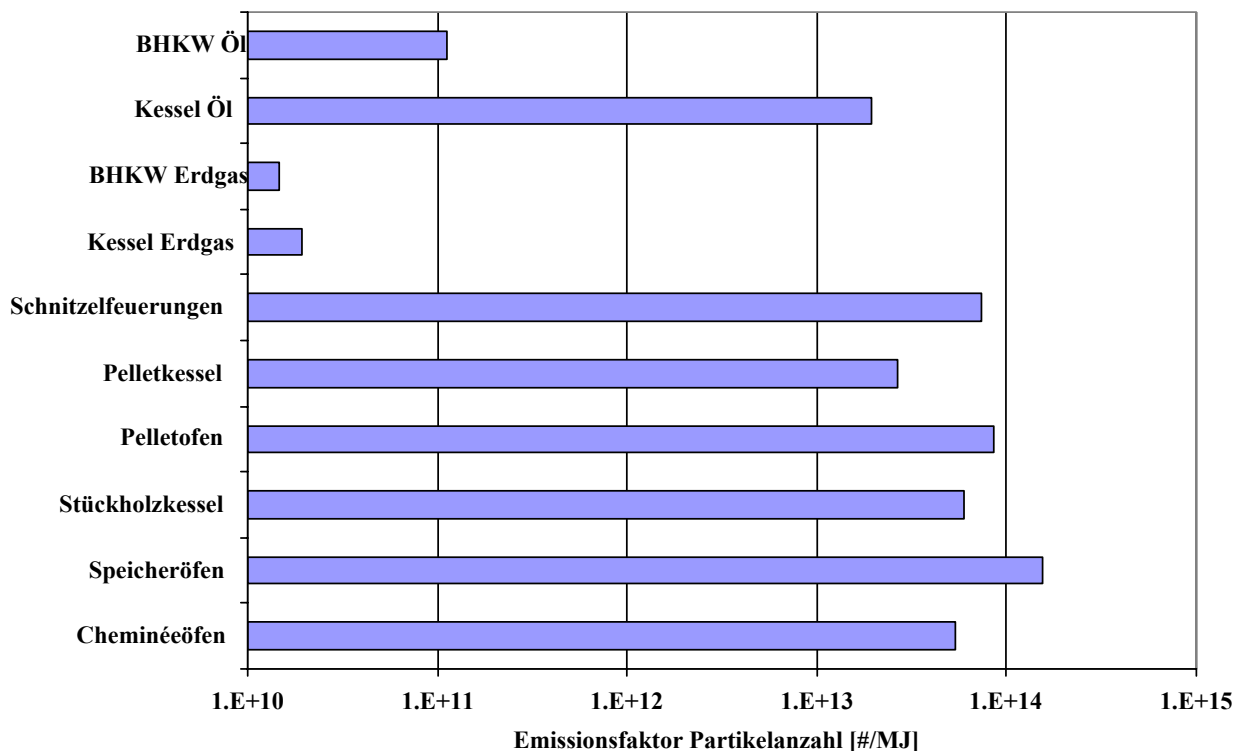


Abbildung 4 Emissionsfaktoren für Partikelzahl < 600 nm von Holzfeuerungen und fossil betriebenen Anlagen.

Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit den Förderstellen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, (BUWAL), dem Bundesamt für Energie, BFE sowie den Lufthygieneämtern der Kantone Aargau, Baselland/Baselstadt, Bern, Luzern und Solothurn durchgeführt. Auf fachlicher Ebene erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Fachhochschulen Bern (*Abgasprüfstelle Biel*, Prof. Dr.

Jan Cervinski) und Aargau (*Institut für Sensoren und Signale*, Windisch, Prof. Dr. H. Burtscher) sowie dem *Labor für Festkörperphysik*, ETH Zürich.

Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projektes beteiligte sich das Ökozentrum Langenbruck an einem Partikelgrößen-Ringversuch in Dortmund. Teilnehmer waren u. a.: Eidgenössisches Amt für Messwesen, METAS, Österreichische Staub- und Silikose-Bekämpfungsstelle, ÖSBS, Institut für Troposphärenforschung, Leipzig, Otto-von-Guernicke Universität, Magdeburg, Deutsches Bundesamt für Industrie und Arbeit, BIA, Deutsche Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, FAL sowie das Deutsche Institut für Gefahrenforschung, IGF.

Mitarbeiter des Ökozentrums Langenbruck nahmen an einem SMPS-Seminar der TSI-GmbH Aachen teil.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Mit den Untersuchungen konnte eine breitere Datenbasis über den Feinpartikelaustritt von Holzfeuerungen im Praxisbetrieb geschaffen werden. Aufgrund der Emissionsdaten können nun für eine gegebene Population von Holzfeuerungen Hochrechnungen zu ihren Quellenanteilen an Feinpartikeln erstellt werden. Die Branche verfügt über Unterlagen, die ihr es ermöglicht, gezielte Massnahmen zur Reduktion der Staubemissionen einzuleiten.

Publikationen

Gaegauf, C.K., Wieser, U., ***Field Investigation of Nanoparticle Emissions from Various Biomass Combustion Systems***
Macquat, Y.

IEA Seminar, Aerosol from Biomass, Zürich, June 2001

Gaegauf, C.K., Wieser, U., ***Field Investigation of Nanoparticle Emissions from Various Biomass Combustion Systems***
Macquat, Y.

5th Conference on Nanoparticle-Measurement,, ETH Zürich, August 2001

Gaegauf, C.K., Macquat, Y. ***Einfluss von Brennstoffqualität und Anlagetechnik auf Partikelemissionen von Hackschnitzelfeuerungen - Ergebnisse aus Feldmessungen***

3. Stuttgarter Holzfeuerungs-Kolloquium, September 2001

Abstract

Field Investigation of Nanoparticle Emissions from Various Biomass Combustion Systems

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 (PM_{0.6}). *Total Suspended Particles* (TSP) were measured simultaneously to compare TSP with the emissions of PM_{0.6}, 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 PM_{0.6} 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 PM_{0.6} emission factor is of a factor 16 lower than the one in wood stack gases.