

BEISPIEL ZUR MESSUNG DER WIRKSAMKEIT EINES PARTIKELABSCHIEDERS FÜR KLEINE HOLZFEUERUNGEN

Ausgearbeitet durch:

Timothy Griffin
Fachhochschule Nordwestschweiz
Leiter der Prüfstelle für Holzfeuerungen

Grüdenstrasse 40
4132 Muttenz

timothy.griffin@fhnw.ch
www.fhnw.ch/technik/itfe

Heinz Burtscher
Fachhochschule Nordwestschweiz
Leiter des Instituts für Aerosol- und Sensortechnik IAST

Klosterzelgstrasse 2
5210 Brugg-Windisch

heinz.burtscher@fhnw.ch
www.fhnw.ch/technik/iast

Muttenz, Stand: 28. Februar 2008

Im Auftrag von **Bundesamt für Umwelt BAFU**
 Bundesamt für Energie BFE

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Ausgangslage	4
2. Elektrostatischer Partikelabscheider	5
3. Beschreibung der Messstrecke / der Feuerungsbedingungen	6
4. Online Messungen	8
4.1. Messaufbau	8
4.2. Resultate	8
4.3. Zeitlicher Verlauf von Masse und Anzahl	8
4.4. Größenverteilungen	11
5. Vorschlag für ein Messverfahren zur Bestimmung der Abscheidegrades von elektrostatischen Partikelabscheidern für Kleinfeuerungen	13

Zusammenfassung

In einem durch das Bundesamt für Umwelt BAFU und dem Bundesamt für Energie BFE finanzierten Projekt wurde ein Messverfahren zur zuverlässigen Bestimmung der Effizienz eines elektrostatischen Partikelabscheiders (ESP) gesucht. Aufgrund dieser Untersuchungen resultierte ein Vorschlag, wie in Zukunft Prüfungen von Partikelabscheidern bei Holzfeuerungen kleinerer Leistung an Prüfstellen möglichst einfach und zuverlässig durchgeführt werden können.

Im Rahmen des Projektes wurde an der Prüfstelle für Holzfeuerungen der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW eine Messstrecke für einen elektrostatischen Partikelabscheider aufgebaut und die erforderliche Messinfrastruktur erweitert.

Anschliessend wurden mit mehreren unabhängigen Messmethoden Untersuchungen zum Abscheidegrad eines ESP durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sowohl mit den massebasierten Onlinemessverfahren (z.B. Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)) wie auch mit den anzahlbasierten (Diffusion Size Classifier (DiSC), siehe auch S.15) Abscheidegrade für Partikel mit einem Durchmesser von unter 10 μm bei mehr als 70% liegen. Partikel aller Grössen werden durch den Abscheider gleich beeinflusst; sowohl die Masse als auch die Partikelanzahl werden um mehr als 70% reduziert.

Gravimetrischen Messmethoden blieben trotz Verbesserungen deutlich unter den Werten der Onlinemessungen. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass bei gravimetrischen Messmethoden die relativ grosse Probeentnahmesonde für die elektrisch hoch geladenen Partikel hinter dem Abscheider ebenfalls als Abscheidefläche wirkt und dadurch das Messresultat beeinflusst wird.

Da grössenaufgelöste Messungen keine starke Abhängigkeit des Abscheidegrads von der Partikelgrösse zeigen, kann gut auch die Anzahlkonzentration zur Beurteilung des Abscheidegrads herangezogen werden. Die Messung der Anzahlkonzentration liefert stabile Resultate und ist mit verfügbaren Onlineverfahren recht einfach durchführbar. Wir empfehlen daher, die Abscheiderbewertung auf der Basis einer Anzahlkonzentrationsmessung durchzuführen.

1. Ausgangslage

Durch die Revision der Luftreinhalte-Verordnung LRV im Rahmen des Aktionsplans Feinstaub, gelten ab 1. Januar 2008 in der Schweiz für neu in Verkehr gebrachte Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe erhöhte Anforderungen bezüglich Staubemissionen.

LRV (Stand 1. Januar 2008)

Art.20 Die folgenden Feuerungsanlagen dürfen nur in Verkehr gebracht werden, wenn ihre Konformität mit den Anforderungen nach Anhang 4 nachgewiesen ist:

...h. Feuerungen für Brennstoffe nach Anhang 5 Ziffern 2 und 3 mit einer Feuerungswärmeleistung bis 350 kW, namentlich Heizkessel, Raumheizer, Herde, Speicheröfen, Heizcheminées (Kamineinsätze) und offenen Kamine (Cheminées); vom Konformitätsnachweis ausgenommen sind handwerklich hergestellte Feuerungen:

*...2. bei denen mit einem Staubabscheidesystem die Konzentration der Feststoffe im Abgas **im Normalbetrieb um mindestens 60 Prozent** vermindert wird.*

Für die Messung der Wirksamkeit von elektrostatischen Partikelabscheidern für Holzfeuerstätten < 70 kW sind bisher keine schweizerischen oder europäischen Normen verfügbar.

Erste eigene Messungen mit Filterprobennahme und anschliessender gravimetrischer Auswertung (in Anlehnung an die Prüfnormen EN 13284-1 und EN 13229) ergaben zum einen eine sehr grosse Streuung der Resultate, zum anderen geringe Abscheidewirkungsgrade, welche in einigen Messungen sogar negativ ausgefallen waren. Ein erster Versuch zur Messung der Anzahlkonzentration (durch das Institut für Aerosol- und Sensortechnik IAST) lieferte hingegen konsistente Resultate mit Abscheidegraden, die gut zu den aufgrund von Berechnungen erhaltenen passten. Als Ursache für die Diskrepanz wurde der Wiedereintrag von abgeschiedenem Material in Form von hochagglomerierten Partikeln vermutet. Darauf deuteten vor allem Ablagerungen auf den Analysefiltern hin: Bei Probenahmen hinter dem Elektroabscheider zeigten sich im Zentrum der Analysefilter konzentrierte Ablagerungen sehr grosser Partikel. Partikel dieser Grösse werden kaum direkt vom Ofen emittiert, es ist deshalb nahe liegend, dies auf Wiedereintrag zurückzuführen. Die Ablagerungen sind sehr gross (>10 µm) und damit lufthygienisch wenig problematisch.

2. Elektrostatischer Partikelabscheider

Der verwendete elektrostatische Partikelabscheider wurde für Holzfeuerungsanlagen mit einer Heizleistung bis maximal 35 kW und Abgasrohren in Stahl mit Durchmessern von 150 bis 300 mm konzipiert.

Der Partikelabscheider besteht aus einer Einheit mit Elektrode und einem durch ein ca. 2 m langes Kabel verbundenen elektronischen Steuergerät. Ein mitgeliefertes Adapterrohrstück von ca. 0,5 m Länge wird in eine bestehende oder neu zu errichtende Abgasleitung einer Feuerstätte vor Ort eingebaut. Die Einheit mit der Elektrode wird auf einfache Weise in dieses Adapterrohr eingebaut. Als theoretische Abscheidestrecke für die ionisierten Partikel des Abgasstroms kann die gesamte verbleibende Kaminrohrlänge nach dem eingebauten Partikelabscheider genutzt werden; realistischere jedoch nur so weit, wie die Partikel ihre Ladung zu behalten vermögen.

Technischen Daten des Partikelabscheiders:

Durchmesser des Adapterrohres	150 mm
Länge der Elektrode	200 mm
Angelegte Spannung	bis 20 kV
Zulässige Temperatur im Bereich der Elektrode	400 °C (kurzzeitig 500 °C)

Ein eingebauter Temperaturfühler schaltet den Partikelabscheider (bei eingeschaltetem Hauptschalter) selbständig ein bzw. aus.

Ein kleiner Spülventilator bläst Umgebungsluft am Isolator der Elektrode vorbei in den Abgasstrom. Der Isolator wird auf diese Weise frei von Verschmutzung gehalten und vermindert dadurch die Gefahr von Spannungsüberschlägen.

3. Beschreibung der Messstrecke / der Feuerungsbedingungen

Für den Aufbau der Messstrecke wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Abstand des Messpunktes nach dem elektrostatischen Partikelabscheider: 4.0 m
- Abstand des Messpunktes vor dem elektrostatischen Partikelabscheider: 0.5 m
- Möglichkeit zu zeitgleichen (parallelen) Messungen vor und hinter dem elektrostatischen Partikelabscheider
- Die Messung von CO, CO₂, O₂, Abgastemperatur sowie Förderdruck soll in Anlehnung an die Prüfnorm EN 13229 erfolgen. Falls Staubkonzentrationen an mehreren Stellen gemessen werden, muss auch der O₂ Gehalt an diesen Stellen gemessen werden.
- Die Messstrecke wurde mit einem stückholzbefeuerten Cheminée mit Nennwärmeleistung nach EN 13229 von 9 kW, als Partikelquelle betrieben werden.

Folgende Bedingungen sind für den Abbrand einzuhalten:

- Die Messung während eines Abbrandes soll 30 min dauern. Ein Abbrand dauert vom Holz auflegen, bis zum Auflegen der nächsten Charge.
- Die Messung wurde gestartet wenn die Temperaturmessstelle in der Messstrecke, 2 m nach dem Abscheider (vgl. Abbildung 2), 270 °C erreicht hatte. Wie in nachstehender Abbildung 1 zu sehen ist, charakterisiert dieser Wert das Brennverhalten gut. Ab diesem Punkt ist die Zündphase zu Ende und es kann von „Normalbetrieb“, gemäss LRV, ausgegangen werden.
- Während des Abbrandes soll im Kamin ein Unterdruck von 12 ± 2 Pa eingehalten werden (EN 13229:2201, 6.1.1).
- Der Abscheidegrad wird als arithmetisches Mittel aus 3 Messungen bestimmt.

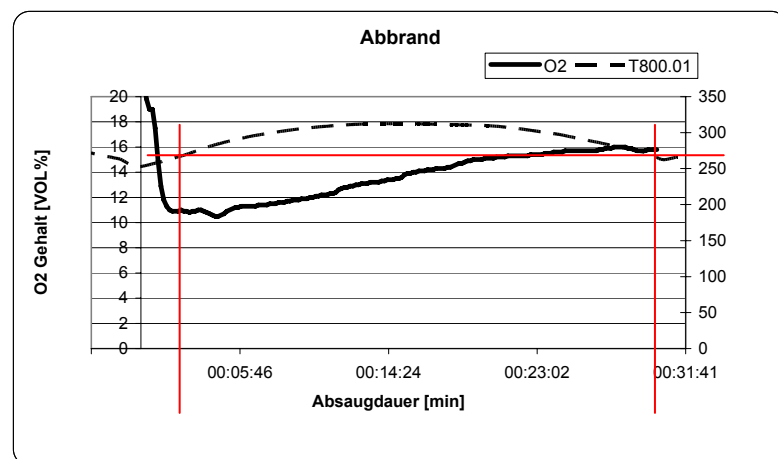


Abbildung 1. Verlauf von Sauerstoff und Abgastemperatur des untersuchten Cheminées innerhalb eines Abbrandzyklus

Infolge der grossen Gesamtlänge der Messstrecke und der nur beschränkt zur Verfügung stehenden Raumhöhe wurde ein horizontaler Aufbau der Messstrecke gewählt. Dabei wurde auf die Erfahrung des Partikelabscheider-Herstellers aus früher durchgeführten Messungen abgestellt, dass durch einen horizontalen Verlauf der Messstrecke kein Einfluss auf das Abscheideverhalten seines Partikelabscheiders festgestellt werden konnte.

Da die Messungen mit dem Cheminée mit Rauchrohranschluss-Ø 180 mm durchgeführt wurden, wurde der Durchmesser der Messstrecke gemäss EN 13229:2001, Bild A.9, mit 150 mm gewählt.

Die Messstrecke wurde aus Kaminrohren aus nicht rostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4404 aufgebaut. Alle Stossstellen der Kaminrohre wurden mit Aluklebeband luftdicht verklebt und mit einer Verbindungsbride gesichert. Der horizontal verlaufende Teil der Messstrecke wurde auf seiner gesamten Länge mit Isolierschalen aus 50 mm starker kaschierter Steinwolle verkleidet.

Der Aufbau der Messstrecke sowie die vorhandenen Messstellen sind aus der Abbildung 2 ersichtlich.

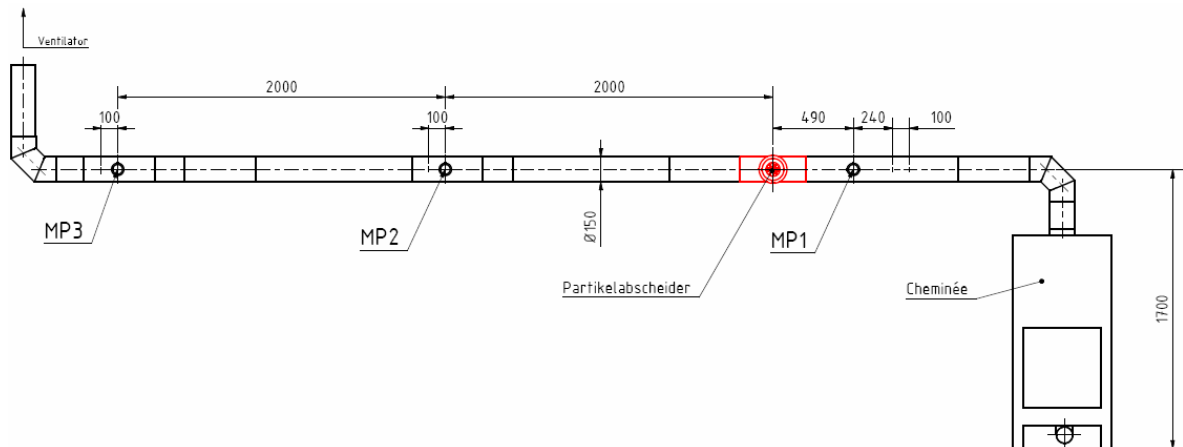


Abbildung 2. Aufbau der Messstrecke für den elektrostatischen Partikelabscheider

4. Online Messungen

4.1. Messaufbau

Während die gravimetrischen Messungen parallel vor und hinter dem Partikelabscheider durchgeführt wurden, wurde bei den Online-Messungen nur hinter dem Partikelabscheider am Messpunkt MP3 gemessen. Die Probenahme erfolgte mit einer Sonde mit 6 mm Innendurchmesser senkrecht zur Strömungsrichtung. Nach der Entnahme wurde das Abgas zunächst mit einem zweistufigen Ejektor Verdüner (Dekati) verdünnt, wobei die erste Stufe und die zugehörige Verdünnungsluft auf 200 °C beheizt wurden. Anschliessend wurden die Partikel mit Hilfe eines ⁸⁵Kr-Neutralisators neutralisiert, um Messfehler durch die im elektrostatischen Partikelabscheider hoch geladenen Partikel zu vermeiden.

Gemessen wurde parallel mit folgenden Geräten:

- Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM, Thermo) zur direkten Massenmessung. Zeitauflösung ca. 20 Sekunden.
- Electrical Low Pressure Impactor (ELPI, Dekati) zur Bestimmung der Grössenverteilung im Bereich 100 nm – 10 µm. Zeitauflösung ca. 5 Sek.
- Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, TSI) zur Messung der Grössenverteilung im Bereich 20 nm – 600 nm. Zeit für einen Grössen-Scan ca. 2 Minuten
- Diffusion Size Classifier (DiSC) zu Messung von Anzahlkonzentration und mittlerem Durchmesser (IAST Eigenentwicklung). Zeitauflösung ca. 1 Sekunde

Abbildung 3 zeigt den Messaufbau. Bedingt durch Partikelverluste in den Verdünnungsstufen bei Partikeln grösser als ca. 10 µm wird mit diesen Messungen nur der Anteil von Partikeln kleiner als 10 µm vollständig erfasst.

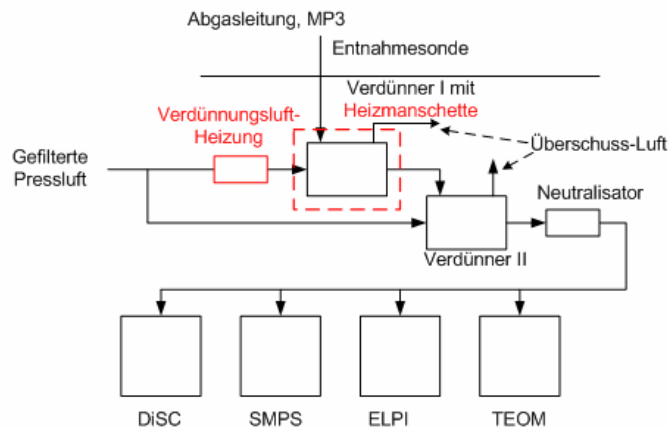


Abbildung 3. Messaufbau für die Online Messungen

4.2. Resultate

Da nur hinter dem Partikelabscheider gemessen wird, wurden Messungen mit ein- und ausgeschaltetem Abscheider durchgeführt, um die Effizienz des Abscheiders bestimmen zu können. In der Versuchreihe vom 20.11.2007 wurden je drei Messreihen mit ein- und ausgeschaltetem Partikelabscheider durchgeführt. Die im Folgenden gezeigten Resultate sind die direkten Messergebnisse, in die der Verdünnungsfaktor nicht eingerechnet wurde. Auf die Bestimmung der Abscheidegrade hat dies aber keinen Einfluss, da der Verdünnungsfaktor mit ein- und ausgeschaltetem Partikelabscheider gleich gross ist.

4.3. Zeitlicher Verlauf von Masse und Anzahl

Abbildung 4 zeigt das Resultat der Massenmessung mit dem TEOM. Dargestellt wird die akkumulierte Masse auf dem Messfilter als Funktion der Zeit für die drei Versuche mit ein- und ausgeschaltetem

Partikelabscheider. Die Resultate aus den drei Abbrandversuchen sind sehr ähnlich, die Reproduzierbarkeit ist also gut. Damit ist es ohne weiteres möglich, die Effizienz des Abscheiders aus hintereinander durchgeführten Messungen bei ein- und ausgeschaltetem Partikelabscheider zu bestimmen.

Abbildung 5 zeigt die über die drei Abbrandversuche gemittelten Ergebnisse sowie den daraus bestimmten Abscheidegrad, der über den gesamten Abbrand 82% beträgt.

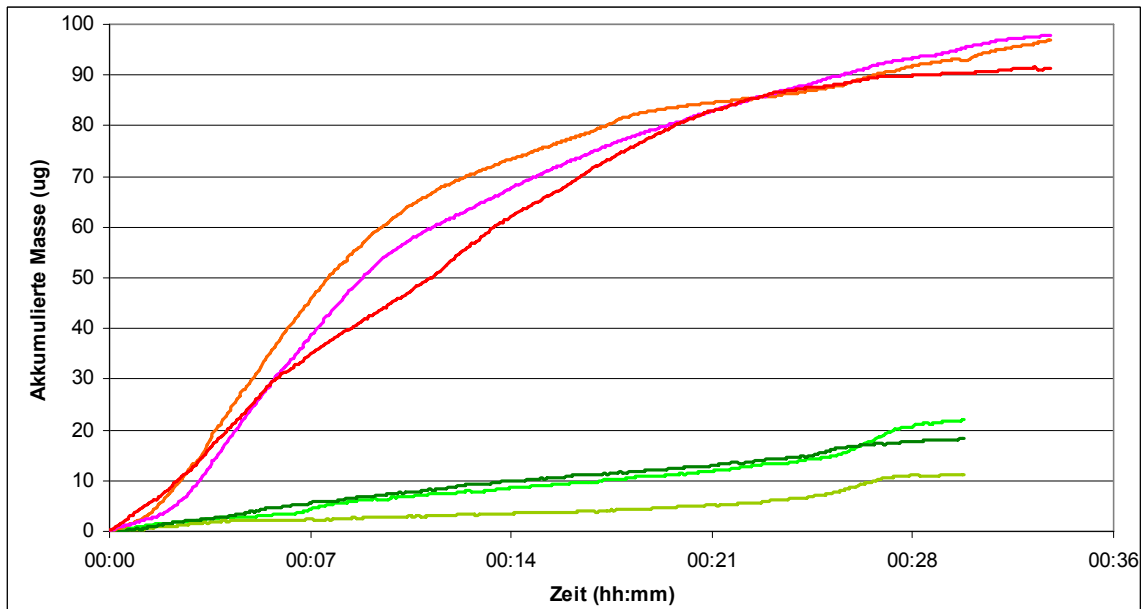


Abbildung 4. Einzelresultate der TEOM-Messungen.

Rote Kurven: Akkumulierte Masse bei ausgeschaltetem Partikelabscheider
Grüne Kurven: Akkumulierte Masse bei eingeschaltetem Partikelabscheider

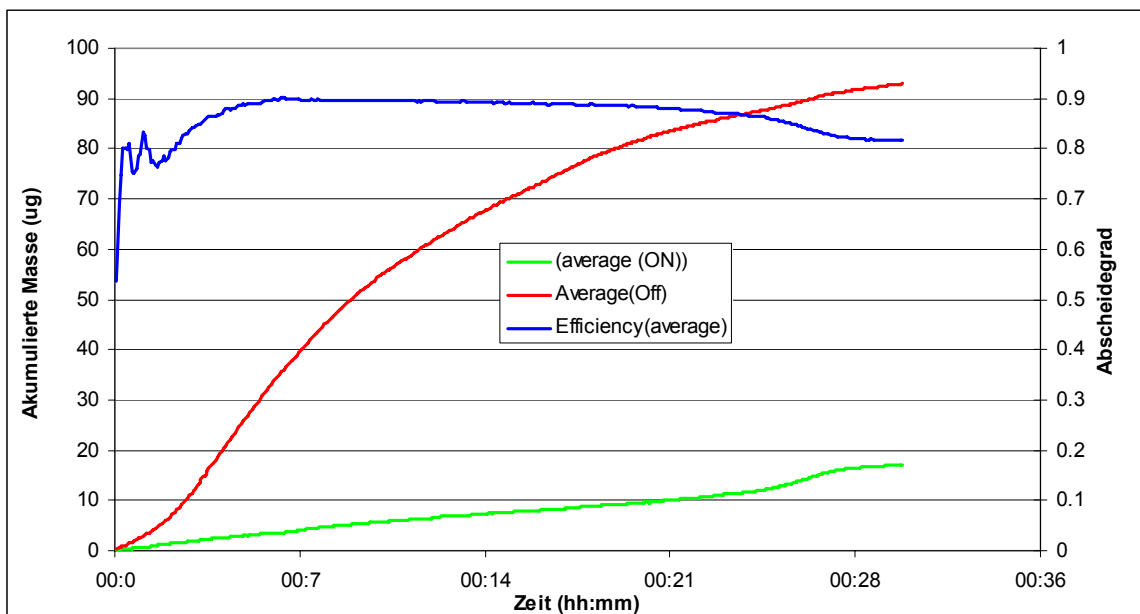


Abbildung 5. Mittelwerte der Messungen in Abbildung 13.

Rot: Partikelabscheider aus
Grün: Partikelabscheider ein
Blau: Abscheidegrad des Partikelabscheiders

Die entsprechenden Messergebnisse mit dem DiSC sind in Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Da die Anzahlkonzentration deutlich empfindlicher auf kleine Änderungen bei den Verbrennungsbedingungen reagiert als die Masse, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen etwas grösser. Der etwas kleinere Abscheidegrad deutet darauf hin, dass ganz kleine Teilchen etwas weniger effizient abgeschieden werden als grössere. Der Abscheidegrad über den gesamten Abbrand liegt aber immer noch bei 75%.

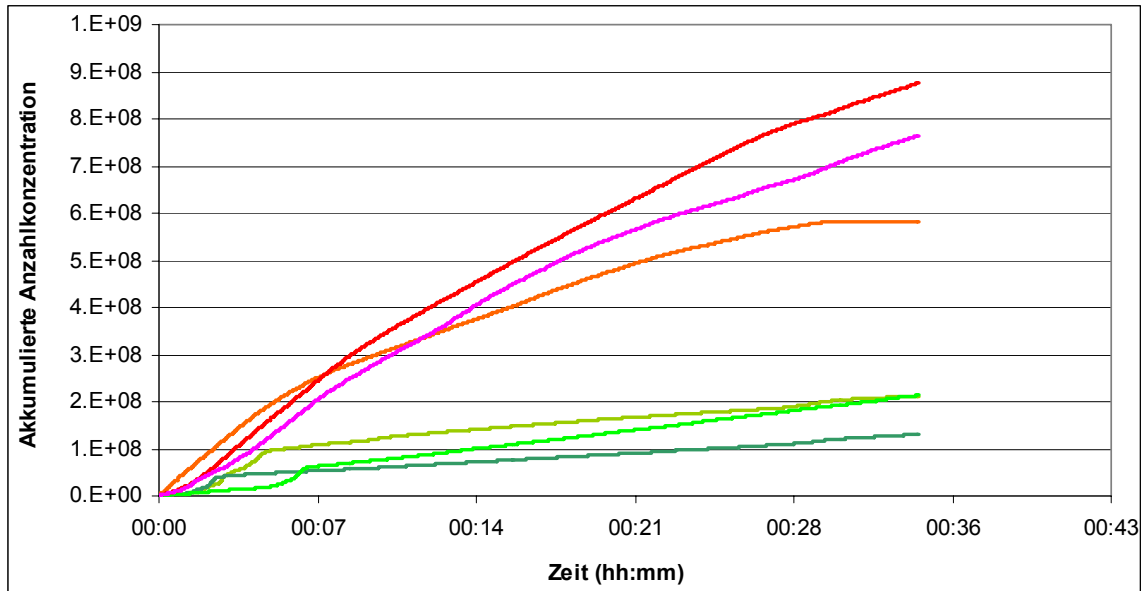


Abbildung 6. Einzelresultate der DiSC-Messungen.
 Rote Kurven: Akkuulierte Partikelanzahl bei ausgeschaltetem Abscheider
 Grüne Kurven: Akkuulierte Partikelanzahl bei eingeschaltetem Abscheider

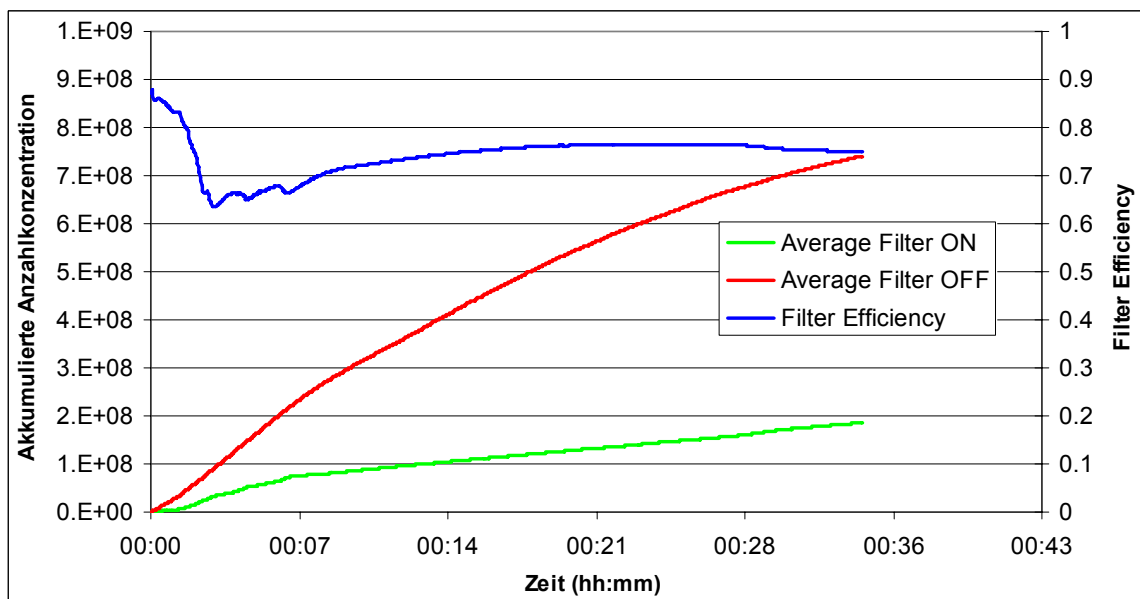


Abbildung 7. Mittelwerte der Messungen in Abbildung 15.
 Rot: Partikelabscheider aus
 Grün: Partikelabscheider ein
 Blau: Abscheidegrad des Partikelabscheiders

4.4. Grössenverteilungen

Als Beispiel werden die Grössenverteilungen zu zwei Zeitpunkten, einer in der ersten Phase der Verbrennung, einer in der Ausbrandphase gezeigt. Beim Vergleich von SMPS und ELPI Daten muss beachtet werden, dass mit dem SMPS der Bewegungsdurchmesser bestimmt wird, mit dem ELPI (Impactor = Trägheitsabscheidung) der aerodynamische Durchmesser, in den auch die Partikelmasse eingeht. Je nach Dichte der Partikel können sich diese Durchmesser erheblich unterscheiden.

Bei den SMPS Messungen dauert die Messung eines Spektrums ca. 2 Minuten. Für eine genaue Messung müsste die Partikelkonzentration während dieser Zeit konstant bleiben, was bei einer Stückholzfeuerung nicht wirklich der Fall ist.

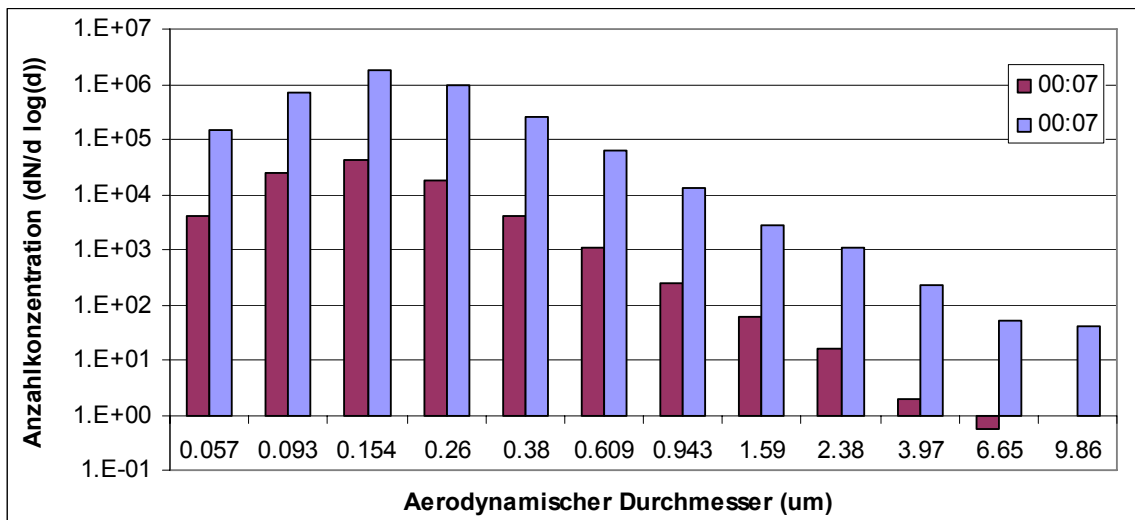


Abbildung 8. Grössenverteilung, gemessen mit dem ELPI 7 Minuten nach Beginn.
 Blaue Balken: Partikelabscheider aus
 Rote Balken: Partikelabscheider ein

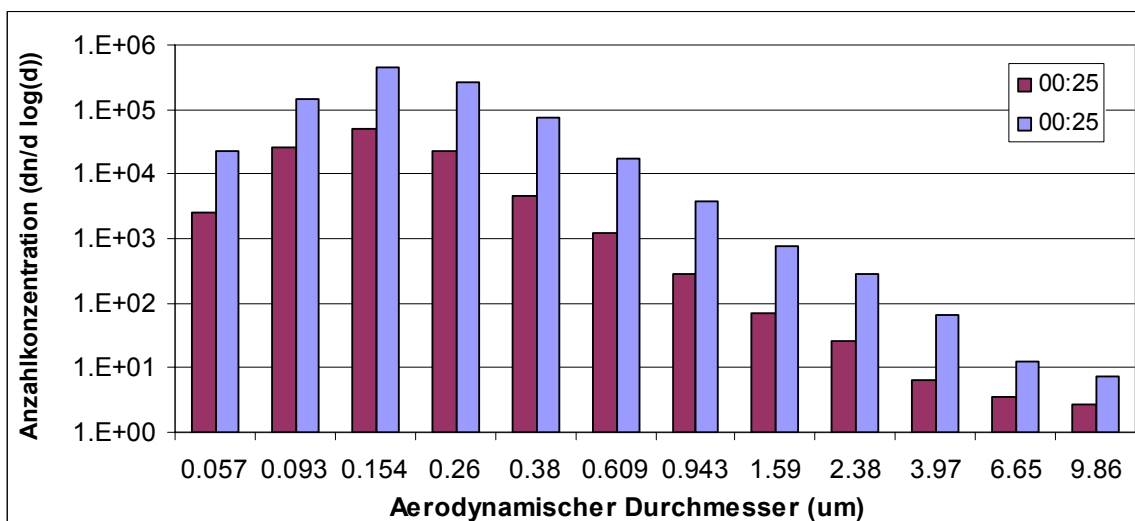


Abbildung 9. Grössenverteilung, gemessen mit dem ELPI 25 Minuten nach Beginn.
 Blaue Balken: Partikelabscheider aus
 Rote Balken: Partikelabscheider ein

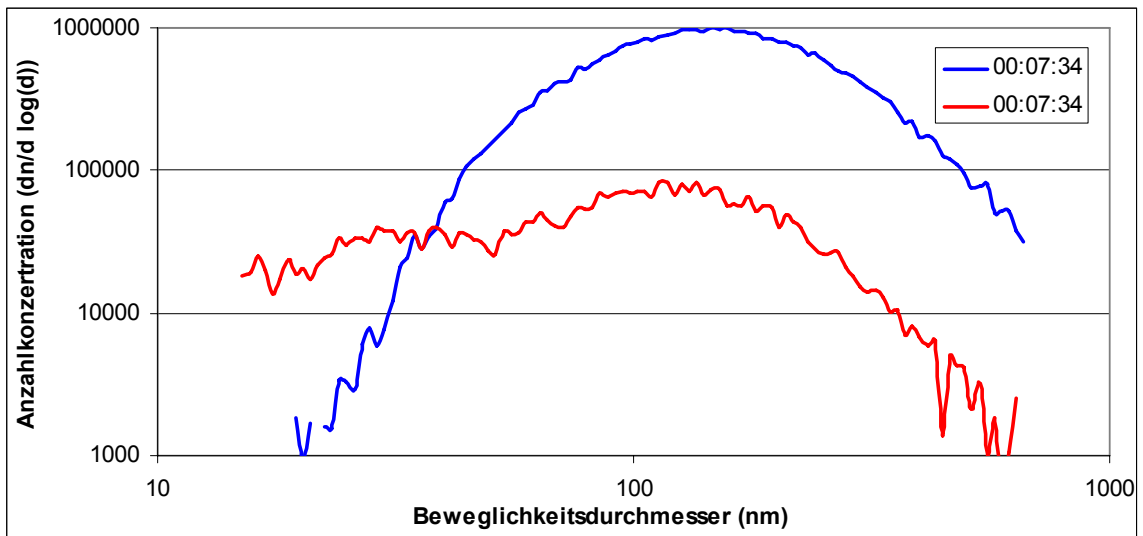


Abbildung 10. Grössenverteilung, gemessen mit dem SMPS 7 Minuten nach Beginn.
 Blau: Partikelabscheider aus
 Rot: Partikelabscheider ein
 Die Überschneidung bei ganz kleinen Partikeln ist sehr wahrscheinlich auf Konzentrationsänderungen während des Messintervalls von 2 Minuten zurückzuführen.

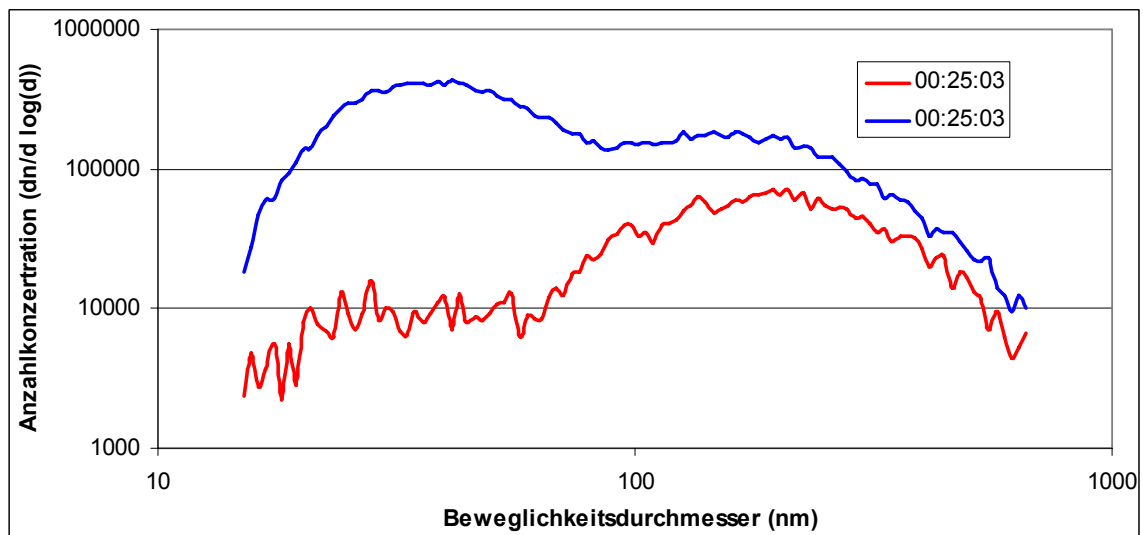


Abbildung 11. Grössenverteilung, gemessen mit dem SMPS 25 Minuten nach Beginn.
 Blau: Partikelabscheider aus
 Rot: Partikelabscheider ein

5. Vorschlag für ein Messverfahren zur Bestimmung der Abscheidegrades von elektrostatischen Partikelabscheidern für Kleinfeuerungen

Die Resultate unserer Untersuchungen haben gezeigt, dass die gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse mit Norm-Sonden hinter der Sprühelektrode von elektrostatischen Partikelabscheidern sehr problematisch ist. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bereits in früheren Untersuchungen gemacht^{1 2}.

Demgegenüber wurden mit den anzahlbasierten Methoden gute Erfahrungen gemacht. Die Messergebnisse sind stabil und gut reproduzierbar. Diese haben ausserdem den Vorteil, dass die Probenahme wesentlich unproblematischer ist und die lufthygienisch wichtige submikrone Fraktion entsprechendes Gewicht erhält.

Die Grössenabhängigkeit des Abscheidegrades bei elektrostatischen Partikelabscheidern ist nicht sehr stark, auch Partikel bis hinunter zu wenigen 10 nm Durchmesser werden effizient abgeschieden. Bei grossen Partikeln ist die Wirkung von elektrostatischen Abscheidern ohnehin hoch. Eine Messung der Anzahlkonzentration liefert demnach zuverlässige Information zur Effizienz des Abscheiders.

Wir schlagen deshalb vor, den Abscheidegrad bei elektrostatischen Partikelabscheidern anhand der Anzahlkonzentration zu bestimmen.

Messgeräte

In erster Linie kommen folgende Geräte in Frage:

- Kondensationskernzähler: Diese sind etabliert und kommen beim Vorschlag für eine neue Typenprüfung bei Dieselmotoren ebenfalls zur Anwendung. Allerdings sind Kondensationskernzähler nur in einem relativ engen Temperaturbereich einsetzbar und auch sonst empfindlich auf Umgebungsbedingungen, was deren Anwendungsbereich erheblich einschränkt.
- Diffusion Size Classifier (DiSC): Dieses am IAST entwickelte Gerät ist sehr viel unproblematischer im Einsatz, ist aber noch nicht so etabliert wie Kondensationskernzähler.

Abgasaufbereitung

Für beide Geräte ist eine vorgängige Verdünnung erforderlich. Da bei der Anzahlkonzentration Partikel grösser 1 µm nicht ins Gewicht fallen ist eine isokinetische Probenahme nicht erforderlich. Die Probenahme kann mit einer einfachen Sonde 90° zur Strömungsrichtung erfolgen, wie dies beim hier beschriebenen Aufbau der Fall war. Zur Verdünnung können Ejektor- oder Rotationsverdünner eingesetzt werden. Wichtig ist, dass bei der Abgasaufbereitung darauf geachtet wird, dass keine hohe Übersättigung auftritt. Dies könnte zur Entstehung zusätzlicher Partikel durch Nukleation führen. Gleich wie bei Dieselmessungen kann dies durch Heissverdünnung erreicht werden. Da Holzfeuerungen mit erheblichem Luftüberschuss betrieben werden, ist die Situation aber wesentlich weniger problematisch als bei Verbrennungsmotoren. Ein Verdünnungsfaktor >10 bei einer Temperatur von 120 °C kann Nukleation zuverlässig verhindern.

Da die Partikel hinter dem elektrostatischen Abscheider hoch geladen sind, müssen sie unmittelbar nach der Verdünnung neutralisiert werden. Dies kann mit einem kommerziell erhältlichen Neutralisator (z.B. mit ⁸⁵Kr) erfolgen. Um den Einsatz einer radioaktiven Quelle überflüssig zu machen, wurde am IAST ein elektrischer Neutralisator entwickelt, der entgegengesetzt geladene Ionen erzeugt, welche die Partikel neutralisieren. In Kürze wird dieser für den gleichen Zweck ebenfalls verfügbar sein.

¹ Staub- und Partikelanalytik an Kleinholzfeuerungen mit elektrostatischem Partikelabscheider, Ökozentrum Langenbruck, 2006

² Feinstaub Partikelabscheider für kleine Holzfeuerungen - Schlussbericht, Holzenergie Emmental, 2007

Messstellen/Durchführung der Messungen

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten zur Durchführung der Messungen:

1. In einem Abbrandzyklus mit je einer Messung stromauf- und stromabwärts des Abscheiders. Dafür müssen zwei komplette Messsysteme (Probeentnahmesonde, Verdünner, Messgerät) verfügbar sein.
2. Messung an nur einem Messpunkt (stromabwärts) in zwei aufeinander folgenden Messzyklen, wobei der Abscheider einmal ein- und einmal ausgeschaltet ist.
3. Messung an nur einem Messpunkt (stromabwärts), wobei der Abscheider während eines Abbrandzyklus mehrmals ein- und ausgeschaltet wird.

Um die Reproduzierbarkeit zu testen sollten mindestens drei Messzyklen durchgeführt werden.

Eine unerwartete Beobachtung im vorliegenden Projekt ist, dass die Messstelle MP1 stromaufwärts des Abscheiders offensichtlich noch stark von diesem beeinflusst wird. Bei eingeschaltetem Abscheider werden dort deutlich niedrigere Konzentrationen gemessen. Wenn gemäss 1. gearbeitet wird, ist bei der Festlegung der Messstellen deshalb auf einen ausreichenden Abstand zu achten. Aufgrund der bisher durchgeführten Messungen können noch keine eindeutigen Angaben gemacht werden, wie gross der Abstand sein muss, 50 cm sollten aber genügen. Um sicher zu sein, sollte vor der eigentlichen Messung in einer kurzen Testmessung kontrolliert werden, ob die Konzentration an der Messstelle stromaufwärts beim Einschalten des Abscheiders unverändert bleibt. Da die vorgeschlagenen Messgeräte online arbeiten, ist dies mit wenig Aufwand möglich. Bei Messungen gemäss 2. oder 3. tritt das eben geschilderte Problem nicht auf.

Bei der Messstelle stromabwärts muss auch ein ausreichender Abstand eingehalten werden. Da ein Teil der Abscheidung erst hinter dem eingebauten Abscheider (Sprühelektrode) erfolgt, ist hier auf die Herstellerangaben zu achten. Beim untersuchten Abscheider sollte die Messstelle mindestens 2 m hinter dem Abscheider liegen. Die in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse wurden im Abstand von 4 m nach dem Partikelabscheider gemessen (Messpunkt MP3).

Kalibration

Da es nur darum geht, die Effizienz des Abscheiders zu bestimmen, das heisst um eine relative Messung, ist eine absolute Kalibration nicht erforderlich. Wenn mit zwei Systemen gearbeitet wird ist wichtig, dass diese (inklusive Verdünnungssystem) gegeneinander kalibriert sind.

Schlussbemerkungen

Der hier gemachte Vorschlag erlaubt eine zuverlässige Bestimmung des Abscheidegrads von elektrostatischen Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen. Das bedeutet aber nicht, dass dieser Vorschlag auch zur Messung der absoluten Staubemissionen von Feuerstätten sinnvoll ist. Falls zukünftig die Anzahlkonzentration limitiert werden soll (wie bei den Emissionen von Personewagen ab EURO 6), kann ein solcher Grenzwert mit den gleichen Verfahren (dann aber mit absoluter Kalibration) überwacht werden. Wahrscheinlich wäre es aber sinnvoll, den sehr unterschiedlichen Partikelfraktionen in Abgasen von Holzfeuerungen (anorganisches Material, elementarer Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffe) Rechnung zu tragen.