

**Forschungsprogramm Biomasse**

Projekt Energiegras und Feldholz

# **Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse**

---

ausgearbeitet durch

**Philipp Hasler**

**Thomas Nussbaumer**

Ingenieurbüro Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich

im Auftrag des

**Bundesamtes für Energiewirtschaft**

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels Kaskadenimpaktor</b>	<b>9</b>
3.1	Beschreibung des Impaktor-Messprinzips	9
3.2	Auswertung von Impaktormessungen	11
3.3	Versuchsdurchführung	15
3.4	Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung	19
<b>4</b>	<b>Versuchsanlagen</b>	<b>23</b>
4.1	Vorschubrostfeuerung	23
4.2	Unterschubfeuerung	24
4.3	Gleichstrom-Festbettvergaser	25
4.4	Labor-Wirbelschichtvergaser	26
<b>5</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>27</b>
5.1	Einfluss des Brennstoffs auf die Partikelgrößenverteilung	27
5.2	Einfluss der Feuerungseinstellung auf die Partikelgrößenverteilung	32
5.3	Partikelgrößenverteilung bei der Holzvergasung in einem Gleichstromvergaser	34
5.4	Partikelgrößenverteilung bei der Holzvergasung in einem Wirbelschichtvergaser	35
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>39</b>
7.1	Reproduzierbarkeit von Impaktormessungen	39
7.2	Partikelgrößenverteilung vor und nach Zyklon	41
7.3	Vergleich innen- und aussenliegender Impaktor	43
7.4	Vergleich von Impaktormessung mit einer Offline Partikelgrößenanalyse	45
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>53</b>

# 1 Zusammenfassung

Zur Einhaltung des Staubgrenzwertes werden heute bei automatischen Biomassefeuerungen bis zu 5 MW<sub>th</sub> vor allem Multizyklone eingesetzt. Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln kann der Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung (150 mg/Nm<sup>3</sup> bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub>) damit in der Regel eingehalten werden. Bei Sägemehl oder Spanplatten sind jedoch Grenzwertüberschreitungen möglich und in einigen Ländern oder Regionen werden zudem tiefere Grenzwerte gefordert. Aus diesen Gründen interessieren leistungsfähige Verfahren zur Staubabscheidung, welche nur einen geringen Mehraufwand im Vergleich zu den heute eingesetzten Multizyklonen ergeben. Die Auslegung und Beurteilung von Staubabscheideverfahren erfordert jedoch Kenntnisse über die Partikelgrössenverteilung.

Eigene Untersuchungen sowie verschiedene Literaturquellen zeigen, dass der Hauptanteil der Partikel aus der Holzverbrennung im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  liegt und dass die Partikel in einer monomodalen Verteilung vorliegen. Teilweise wurden bimodale Verteilungen mit einem zweiten Maximum bei relativ grossen Partikeln gefunden. Die Untersuchungen in der Literatur beschränken sich in den meisten Fällen auf die Verbrennung von naturbelassenem Holz. Zudem fehlen Angaben zu den verwendeten Feuerungssystemen und den gewählten Betriebsbedingungen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollen deshalb weitere Kenntnisse über die Einflussfaktoren auf die Partikelgrössenverteilung bei der Holzverbrennung ermittelt werden. Folgende Einflussgrössen stehen dabei im Vordergrund:

- Brennstoff: Naturbelassenes Holz, Spanplatten, Rinde, Altholz, Gras
- Verfahren: Vergasung und Verbrennung
- Feuerungssystem: Unterschubfeuerung und Vorschubrostfeuerung
- Feuerungseinstellung: Primärluftanteil und Abgasrückführung
- Holzvergasung: Festbettvergasung und Wirbelschichtvergasung

Die Partikelgrössenverteilungen werden mit einem Andersen Kaskadenimpaktor im Abgas ermittelt. Es wird gezeigt, dass die Partikelgrössenverteilungen durch den Brennstoff und den Feuerungsbetrieb beeinflusst werden.

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Spanplatten, Altholz und Gras liegen mehr als 80% der Partikelmasse im Grössenbereich  $< 1 \mu\text{m}$  (angegeben als aerodynamische Partikeldurchmesser). Die submikronen Partikelkonzentrationen variieren auf der untersuchten Rostfeuerung und den üblichen Feuerungseinstellungen von 70 mg/Nm<sup>3</sup> bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub> (naturbelassenes Holz) bis 580 mg/Nm<sup>3</sup> (Gras). Die Partikelgrössenverteilungen sind annähernd monomodal. Die höchsten Partikeldichten liegen im Bereich von 0.1  $\mu\text{m}$  (naturbelassenes Holz, Spanplatten, Gras) bis 0.2  $\mu\text{m}$  (Altholz). Eine Ausnahme bildet Rinde, bei dessen Verbrennung lediglich rund 50% oder 30 mg/Nm<sup>3</sup> der Flugstaubpartikel im Submikronbereich  $< 1 \mu\text{m}$  beobachtet werden. Die Verteilung ist zudem bimodal mit Maxima im Bereich von 0.1  $\mu\text{m}$  und ca. 6  $\mu\text{m}$ . Da Multizyklone für Partikel ab ca. 2  $\mu\text{m}$  ein gutes Abscheideverhalten aufweisen, sind bei Abgasen aus der Verbrennung von Rinde oder rindenreichem Holz höhere Staubabscheidegrade im Zyklon möglich als bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Die Feuerungseinstellung, insbesondere die Abgasrückführung, hat bei der untersuchten Unterschubfeuerung einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtstaubgehalt im Abgas, nicht hingegen auf die relative Verteilungsdichtefunktion. Bei maximaler Abgasrückführung wurde ein Gesamtstaubgehalt von rund 30 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht, während ohne Abgasrückführung rund 110 mg/Nm<sup>3</sup> gefunden wurden.

Bei den untersuchten Betriebsbedingungen weisen sämtliche Partikelfractionen eine weisse Farbe auf. Da unverbrannter Kohlenstoff die Partikel grau bis schwarz verfärbt, ist davon auszugehen, dass die submikronen Partikel nicht auf unverbrannte Bestandteile des Brennstoffes zurückzuführen sind. Dagegen sind die Partikel auf flüchtige Brennstoffbestandteile sowie Mineralstoffe zurückzuführen, weshalb bei gleichen Verbrennungsbedingungen ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Gesamtstaubgehalt und dem Aschegehalt im Brennstoff vermutet wird.

Bei der Holzvergasung in einem Festbettvergaser nach dem Gleichstromprinzip und in einem Wirbelschichtvergaser werden bimodale Partikelgrössenverteilungen beobachtet. Die Maxima der Partikeldichten liegen bei ca. 0.2 µm und ca. 5 µm (Festbett) bzw. bei ca. 1.5 µm und ca. 20 µm (Wirbelschicht). Im Festbettvergaser wird eine Partikelkonzentration von rund 230 mg/Nm<sup>3</sup> gefunden, im Wirbelschichtvergaser von rund 10 000 mg/Nm<sup>3</sup>. Der Massenanteil der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von > 5 µm beträgt rund 70% (Festbett) bzw. 90% (Wirbelschicht).

## 2 Einleitung und Zielsetzung

Für die Verbrennung von Holzbrennstoffen gilt in der Schweiz ein Emissionsgrenzwert für den Gesamtstaub nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV 1992) von  $150 \text{ mg/Nm}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  in Anlagen zwischen 70 kW und 1 MW sowie von  $150 \text{ mg/Nm}^3$  bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$  für Anlagen von 1 MW bis 5 MW. Ab 5 MW muss ein Grenzwert von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$  eingehalten werden. In einigen Ländern oder Regionen werden auch für Anlagen unter 5 MW Grenzwerte von 50 oder  $100 \text{ mg/Nm}^3$  gefordert. Die Abgasreinigung erfolgt bei automatischen Holzfeuerungen bis 5 MW in der Regel mit Multizyklo- nen. Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln ist die Einhaltung des Staubgrenzwertes zumeist möglich, bei der Verbrennung von Sägemehl oder Spanplatten sind jedoch Grenzwertüberschreitungen relativ häufig. Gesamtstaubgehalte von weniger als  $100 \text{ mg/Nm}^3$  oder gar  $50 \text{ mg/Nm}^3$  können mit Multizyklo- nen nicht eingehalten werden, sofern der Rohgasstaub- gehalt deutlich höher ist.

Aus diesem Grund interessieren leistungsfähige Verfahren zur Staubabscheidung, welche nur einen geringen Mehraufwand im Vergleich zu den heute eingesetzten Multizyklo- nen ergeben. In Frage kommen einerseits Elektro- und Gewebefilter, welche als Stand der Technik gelten, jedoch hohe Investitions- und Betriebskosten verursachen. Daneben werden auch neuartige Abscheideverfahren geprüft, insbesondere ein rotierender Partikelseparator (RPS) gemäss [Brouwers 1996a]. Das Ab- scheideverhalten heute üblicher Entstaubungsverfahren zeigt Abbildung 2.1.

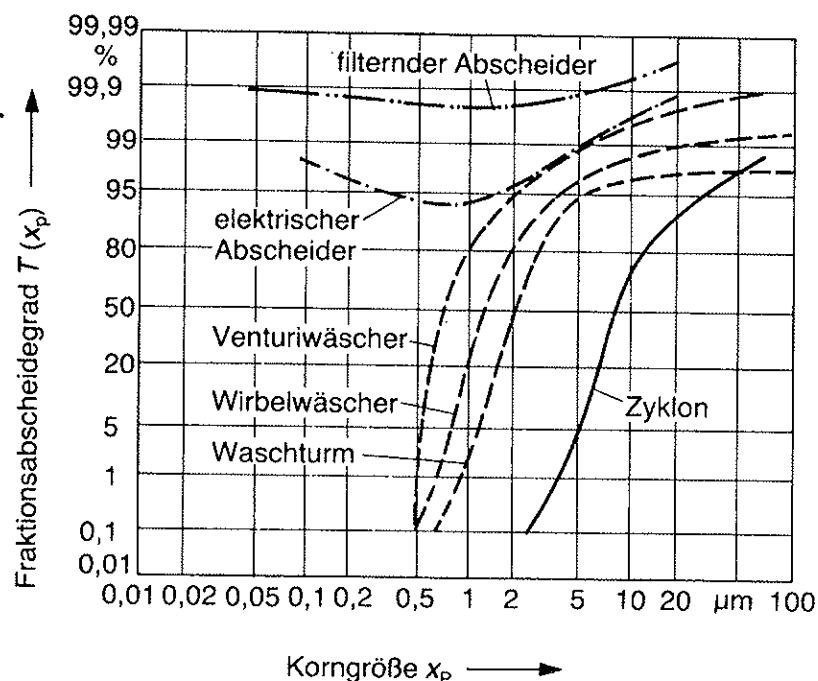


Abbildung 2.1: Abscheidegrade in Abhängigkeit der Partikelkorngrösse von einigen Staubabscheidern nach [Fritz et al. 1990]

Die Auslegung und Beurteilung von Staubabscheideverfahren erfordert Kenntnisse über die Partikelgrössenverteilung. Eigene Untersuchungen mit einem Kaskadenimpaktor [Nussbaumer 1989], [Kleinn 1997] sowie verschiedene Literaturquellen ([Fissan et al. 1980], [Dasch 1982], [Baumbach 1993], [Hüglin 1997]) zeigen, dass der Hauptanteil der Partikel aus der Holzverbrennung im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  liegt und dass die Partikel in einer monomodalen Verteilung vorliegen. Demgegenüber haben Untersuchungen aus Österreich [Obernberger et al. 1996] eine bimodale Verteilung mit einem zweiten Maximum bei relativ grossen Partikeln ergeben. Die Untersuchungen in der Literatur beschränken sich in den meisten Fällen auf die Verbrennung von naturbelassenem Holz. Zudem fehlen Angaben zu den verwendeten Feuerungssystemen und den gewählten Betriebsbedingungen.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf die Beschreibung von Partikelgrössenverteilungen. Die wichtigsten Einflussfaktoren, welche zur Bildung der beobachteten Verteilungen führen, werden nicht ermittelt. Viele in der Literatur beschriebenen Messverfahren basieren zudem auf Partikelanzahlmessungen, wie dies bei Aerosolen üblich ist. Die Beurteilung von Staubabscheideverfahren oder von Feuerungsanlagen erfolgt jedoch gemäss den Vorgaben der LRV anhand der Partikelmasse.

Mit der vorliegenden Untersuchung sollen erste Kenntnisse über die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Partikelgrössenverteilung bei der Holzverbrennung ermittelt werden. Folgende Versuchsparmeter stehen dabei im Vordergrund:

- Brennstoff: Naturbelassenes Holz, Spanplatten, Rinde, Altholz, Gras
- Verfahren: Vergasung und Verbrennung
- Feuerungssystem: Unterschubfeuerung und Vorschubrostfeuerung
- Feuerungseinstellung: Primärluftanteil und Abgasrückführung
- Holzvergasung: Festbettvergasung und Wirbelschichtvergasung

### **3 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels Kaskadenimpaktor**

Die Messmethoden zur Partikelgrößenverteilung lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Verfahren, welche die Massenkonzentrationen im jeweiligen Größenbereich ermitteln, wie z.B. Kaskadenimpaktoren, und Verfahren, die eine Anzahlkonzentration messen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ausschliesslich Messungen mit einem Kaskadenimpaktor durchgeführt.

Bei den Methoden, die eine Anzahlkonzentration messen, gibt es Verfahren, die eine absolute Partikelanzahl angeben und solche, die eine relative Verteilung der Partikelgrößen messen. Die wichtigsten Verfahren, die eine Anzahlkonzentration als Messergebnis liefern, sind:

- Aerodynamischer Partikelzähler
- Differentieller Mobilitätsanalysator (DMA)
- Elektrischer Aerosolanalysator (EAA)
- Fotoelektrischer Aerosolsensor (PAS)

Bei bekannter Partikeldichte kann aus der Anzahl- die Massenkonzentration ermittelt werden. Eine umfassende Beschreibung dieser und weiterer Methoden sind z.B. in [Willeke et al. 1993] zu finden. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ist das Sammeln des Partikelkollektivs aus dem Abgasstrom und das separate Ermitteln der Partikelgrößenverteilung mit einem off-line Partikelgrößenanalysator. Zur Staubsammlung können z.B. dieselben Probenahmeverfahren wie zur Bestimmung des (Gesamt-) Staubgehaltes verwendet werden. Zur off-line Bestimmung werden die Partikel z.B. in einer geeigneten Flüssigkeit dispergiert und mittels Sedimentationsverfahren nach der Partikelgrösse klassiert und mittels optischer Trübungsmessung analysiert (siehe Anhang 7.4).

#### **3.1 Beschreibung des Impaktor-Messprinzips**

Beim Impaktor-Messverfahren wird aus dem zu untersuchenden Abgasstrom ein repräsentativer Teilvolumenstrom auf eine Serie von Impaktionsplatten geleitet (Abbildung 3.1). Hierzu muss die Absaugung ein repräsentativer Gasstromes bei isokinetischen Bedingungen erfolgen, d.h. das Messgas wird mit gleicher Geschwindigkeit aus dem Hauptgasstrom abgesaugt.

Auf den Impaktionsplatten wird der Luftstrahl umgelenkt (Abbildung 3.2). Partikuläre Teilchen erfahren aufgrund ihrer Trägheit eine andere Umlenkung als das Gas, so dass Partikel auf den Platte abgeschieden werden können. In einem Kaskadenimpaktor sind mehrere solcher Umlenkungen hintereinander aufgebaut. In immer engeren Umlenkungen werden höhere Geschwindigkeiten erreicht und somit immer kleinere bzw. leichtere Partikel abgeschieden. Die auf den einzelnen Platten abgelagerten Partikelmassen werden mit einer Analysenwaage ausgewogen.

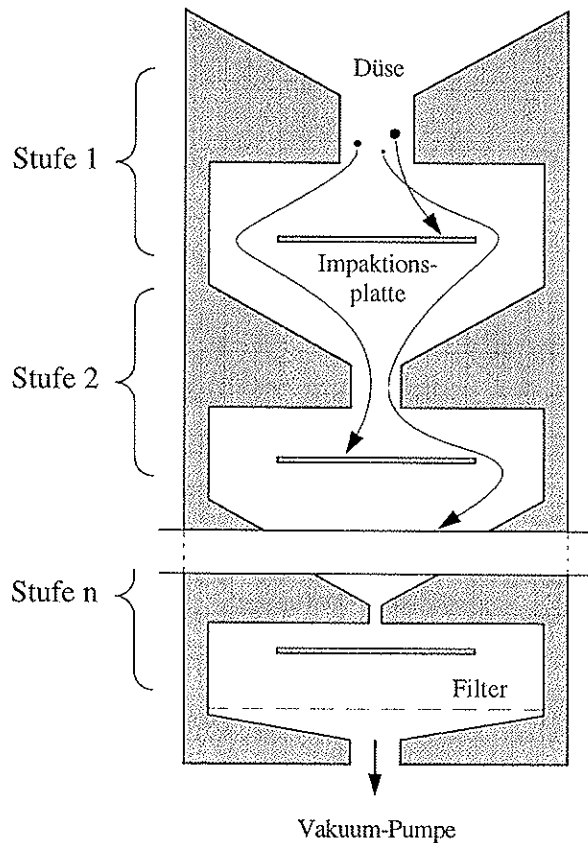


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau eines Kaskadenimpaktors

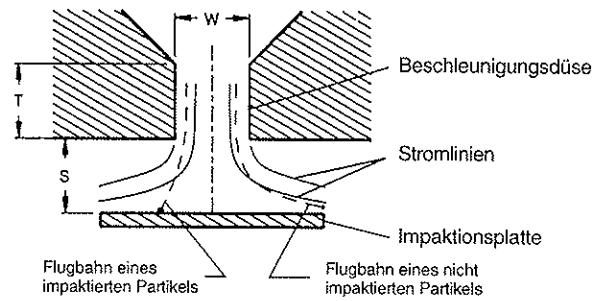


Abbildung 3.2: Strömungsbild über einer Impaktorplatte

Es existieren verschiedene Bauarten von Kaskadenimpaktoren. Sie unterscheiden sich z.B. in der maximal zulässigen Arbeitstemperatur, in der Düsenart (Punktdüsen oder Spaltdüsen) oder darin, ob sie mit mittlerem (z.B.  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) oder hohem Volumenstrom (z.B.  $>30 \text{ m}^3/\text{h}$ ) beaufschlagt werden können. Eine Zusammenstellung von kommerziellen Kaskadenimpaktoren ist in [Willeke et al. 1993] zu finden. Für diese Untersuchung wird ein 8-stufiger Andersen Kaskadenimpaktor für hohe Temperaturen und mittlere Volumenströme eingesetzt. Der mittels Kaskadenimpaktoren messbare Größenbereich an Partikeln hängt vom verwendeten Impaktortyp, der Stufenbauart und von der Saugleistung der Pumpe ab. Mit Kaskadenimpaktoren, welche bei einem mittleren Volumenstrom arbeiten, können Partikel im Größenbereich von z.B.  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$  bis ca.  $20 \text{ }\mu\text{m}$  gemessen werden.



## 3.2 Auswertung von Impaktormessungen

Die auf den Platten abgeschiedenen Partikelmassen können anhand der gemessenen Versuchsbedingungen einer Partikelgrößenklasse zugeordnet werden. Jeder Impaktorstufe ist ein sogenannter Cut off Durchmesser zugeordnet, welcher von den Versuchsbedingungen und der Grösse und Anzahl der Löcher auf der Impaktorplatte abhängt. Die Beschreibung des Partikelverhaltens bei der Impaktion erfolgt gemäss (z.B. [Cushing et al. 1976])

$$\Psi = D_p^2 \frac{C \rho_p v}{18 \mu D_c}$$

mit	$\Psi$	Trägheitsparameter oder Stokes-Zahl
	$C$	Cunningham Korrekturfaktor [–]
	$\rho_p$	Partikeldichte [kg/m³]
	$v$	Düsengeschwindigkeit [m/s]
	$\mu$	dynamische Gasviskosität [kg / m s]
	$D_c$	Düsendurchmesser [m]

Die Wurzel der Stokes-Zahl  $\sqrt{\Psi}$  entspricht einer dimensionslosen (Partikel-) Menge, welche der Partikelgrösse proportional ist. Der zu einem Abscheidegrad von 50 Massen.-% zugehörige Partikeldurchmesser wird als  $d_{p,50}$ -Wert oder auch als effektiver Cut off Durchmesser (ECD = effective Cut off diameter) bezeichnet. Für eine Impaktorstufe mit N Lochdüsen ergibt sich nach Umformen von obiger Gleichung für den  $d_{p,50}$ -Wert bzw. den effektiven Cut off Durchmesser folgende Beziehung:

$$d_{p,50} = \sqrt{\frac{18 \mu \Psi N \pi D_c^3}{4 C \rho_p V^*}}$$

$N$	Anzahl der Düsen pro Platte [–]
$V^*$	abgesaugter Volumenstrom bei Betriebsbedingungen [m³/s]
$\Psi$	= 0.14 für $d_{p,50}$

Der Cunningham Korrekturfaktor  $C$  ist durch den Partikeldurchmesser  $d_p$  und die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle  $\lambda$  gegeben:

$$C = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[ 2.514 + 0.8 \exp\left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda}\right) \right]$$

Der Cunningham Korrekturfaktor enthält den Partikeldurchmesser  $d_p$ , so dass die Berechnung des Cut Offs iterativ erfolgen muss. Die Vernachlässigung des Exponentialterms in der Berechnungsformel führt bei Partikeldurchmessern  $>0.3 \mu\text{m}$  zu einem Fehler von  $<1\%$  [s.a. Kleinn 1997]. Für die mittlere freie Weglänge der Moleküle  $\lambda$  gilt:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_m^2}$$

mit  $n$  Molekülkonzentration [Anzahl/m<sup>3</sup>]  
 $d_m$  Stossquerschnitt  $d_m$  ( $d_m = 0.37$  nm für Luft)

Die Partikeldurchmesser werden üblicherweise als aerodynamischer Durchmesser  $d_a$  angegeben, da letzterer das Verhalten der Partikel in einem Luftstrom und in der Lunge besser charakterisiert als der auf die effektive Dichte des Partikels bezogene Stokes'sche Durchmesser  $d_s$ . Der aerodynamische Partikeldurchmesser ist definiert als der Durchmesser einer Kugel mit der Normdichte  $\rho_0 = 1$  g/cm<sup>3</sup> und der gleichen Sinkgeschwindigkeit wie ein unregelmässiges Partikel mit dem Durchmesser  $d_s$ . Die beiden Durchmesser hängen wie folgt voneinander ab:

$$d_a = d_s \frac{\rho_p}{\rho_0}$$

Bei der Auswertung von Impaktorversuchen geht man von einem idealen Abscheideverhalten des Impaktors aus. Ein idealer Impaktor liegt dann vor, wenn die Abscheidegrade unmittelbar vor und nach dem effektiven Cut off Durchmesser 100% beziehungsweise 0% betragen, die Abscheidekurve im Bereich des ECD demnach annähernd senkrecht verläuft (s.a. Abbildung 3.10).

Zum Vergleich der Messungen werden die Staubgehaltswerte immer auf einen O<sub>2</sub>-Bezugswert von 11 Vol.-% berechnet. Die einfachste Darstellungsform von Ergebnissen aus Impaktormessungen ist die Verteilung der gefundenen Massenanteile (Abbildung 3.3).

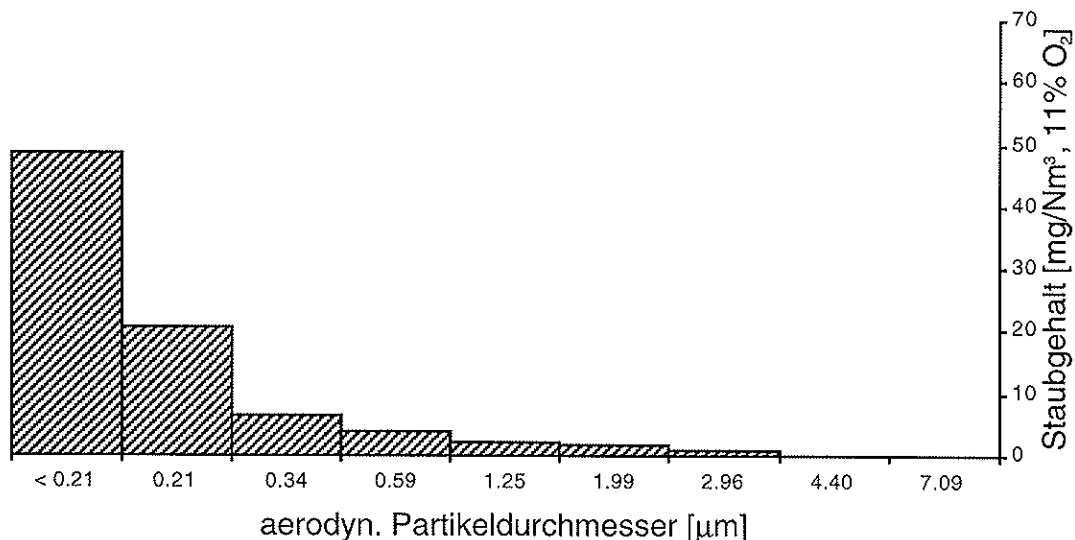


Abbildung 3.3: Grössenverteilung von Flugstaubpartikel aus der Holzverbrennung (Histogramm-Darstellung)  
 Bemerkungen: Die Partikelgrössenverteilung wurde bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung ermittelt (Messung Nr. 7); Der Gesamtstaubgehalt beträgt 85 mg/Nm<sup>3</sup>; Die Messung erfolgte im Abgas nach dem Multi-zyklon; Staubgehalte mit Bezug auf 11 Vol.-% O<sub>2</sub>.

Für diese Darstellungsform ist keine Umrechnung von Messwerten oder Annahmen betreffend oberer oder unterer Partikelgrösse erforderlich. Die Histogrammdarstellung kann jedoch nicht als kontinuierliche Verteilungsfunktion ausgedrückt werden, so dass ein Vergleich von verschiedenen Partikelgrössenverteilungen schwieriger ist, falls die Partikelgrössenklassen nicht gleich sind. Die Darstellung ist hingegen einfach verständlich und illustrativ. In diesen Bericht werden die Partikelgrössenverteilungen vor allem anhand der Histogramm-Darstellung diskutiert.

Andere Darstellungsformen von Partikelgrössenmessungen sind die Verteilungssummenkurve oder die Verteilungsdichtefunktion, wobei letztere mathematisch betrachtet der Ableitung der Verteilungssummenkurve entspricht. Die Verteilungsdichte ist definiert als der Mengenanteil in einem Bereichsintervall der Partikelgrössen, bezogen auf die Intervallbreite:

$$q(d_p) = \frac{\partial Q(d_p)}{\partial d_p} \approx \frac{Q(d_{p2}) - Q(d_{p1})}{d_{p2} - d_{p1}} = \frac{\Delta m(d_{p1}, d_{p2})}{d_{p2} - d_{p1}}$$

wobei  $q(d_p)$ : Verteilungsdichtefunktion  
 $Q(d_p)$ : Verteilungssummenfunktion  
 $d_{p1}, d_{p2}$ : aerodyn. Partikeldurchmesser in [ $\mu\text{m}$ ]  
 $\Delta m(d_{p1}, d_{p2})$ : Partikelmasse in der Grössenklasse zwischen  $d_{p1}$  und  $d_{p2}$  in [g]

Partikeldichtefunktionen lassen sich in einigen Fällen als Normalverteilung beschreiben. Normalverteilungen können z.B. dann beobachtet werden, wenn eine Messgrösse, welche einen einzelnen Wert besitzt, von einer Vielzahl von kleinen additiven (+ oder -) Faktoren beeinflusst ist. Eine normalverteilte Grösse ist z.B. die Länge eines Werkstücks, welches mit einem Sägewerkzeug bearbeitet wird. In der Aerosoltechnik werden jedoch häufig logarithmisch normalverteilte Verteilungen beobachtet. Partikelgrössenverteilungen haben oftmals Standardabweichungen, die grösser sind als die Mittelwerte. Dies führt bei der Normalverteilung zu negativen Werten, was physikalisch nicht sinnvoll ist. Derartige Verteilungen lassen sich üblicherweise mit logarithmisch normalverteilten Verteilungen besser beschreiben [Willeke et al. 1993]. Die Dichtefunktion wird in diesen Fällen in folgender Form ausgedrückt:

$$q^*(d_p) = \frac{\partial Q(d_p)}{\partial \log d_p} \approx \frac{Q(d_{p2}) - Q(d_{p1})}{\log d_{p2} - \log d_{p1}} = \frac{\Delta m(d_{p1}, d_{p2})}{\Delta \log d_p}$$

wobei  $q^*(d_p)$ : log-normalverteilte Verteilungsdichtefunktion  
 übrige Parameter wie oben

Aus der Messung der Partikelgrössenverteilung mittels Kaskadenimpaktor liegen nur eine begrenzte Anzahl Messpunkte vor, so dass die Verteilungsdichte- und -summenfunktion aufgrund einiger weniger Messwerte ermittelt werden müssen. Andere Messverfahren wie z.B. das SMPS-Verfahren (=scanning mobility particle sizer) erzeugen ein annäherndes Kontinuum von Messwerten.

Für die Darstellung als Partikeldichte- oder Partikelsummenfunktion müssen für den tiefsten und höchsten mittleren Partikeldurchmesser Annahmen getroffen werden. Der untere Partikeldurchmesser ist durch das Rückhaltevermögen der Nextel™-Filtermatte bestimmt, welches als Totalfilter verwendet wird. Da das Filtermaterial im Einsatz von Gewebefilteranlagen üblicherweise Reingasstaub-

gehalte von 10 bis 20 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht, wird als unterer Wert 0.1 µm geschätzt. Als oberer Partikeldurchmesser wird ein Wert von 30 µm geschätzt.

In der Abbildung 3.5 und Abbildung 3.4 sind Beispiele von Messwerten der Partikelsumme und der Partikeldichten aus einer Impaktormessung im Abgas einer Holzfeuerung dargestellt. Die Dichte- und Summenfunktion wird zur Veranschaulichung mit einer log-Normalverteilung bzw. der integrierten Form davon approximiert. Mit denselben Verteilungsparametern gelingt es allerdings nicht, eine gleich gute Approximation für die beiden Funktionen zu erzielen.

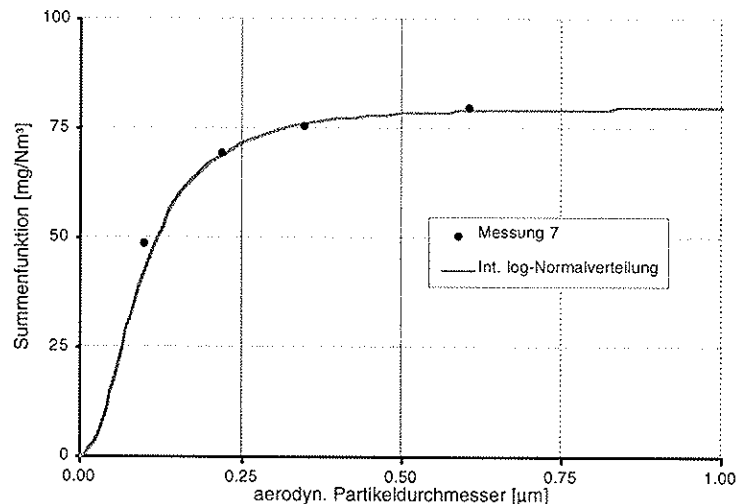


Abbildung 3.4: Summenkurve von Flugstaubpartikeln aus der Holzverbrennung in Abhängigkeit des aerodynamischen Partikeldurchmessers

Bemerkungen: Messwerte aus dem Versuch 7; die Summenfunktion wird nur im Bereich von 0 bis 1 µm aufgezeigt, da sie im Bereich > 1 µm nur geringe Änderungen aufweist; Approximation der Summenfunktion durch integrierte Form einer log-Normalverteilung mit einem Mittelwert von  $x_{\text{mean}} = 0.09 \mu\text{m}$  und einer Standardabweichung  $s_{\text{dev}} = 0.35 \mu\text{m}$ ; die maximale Düsen- geschwindigkeit auf der letzten Impaktorstufe mit einem Cut off von 0.22 µm beträgt 136 m/s.

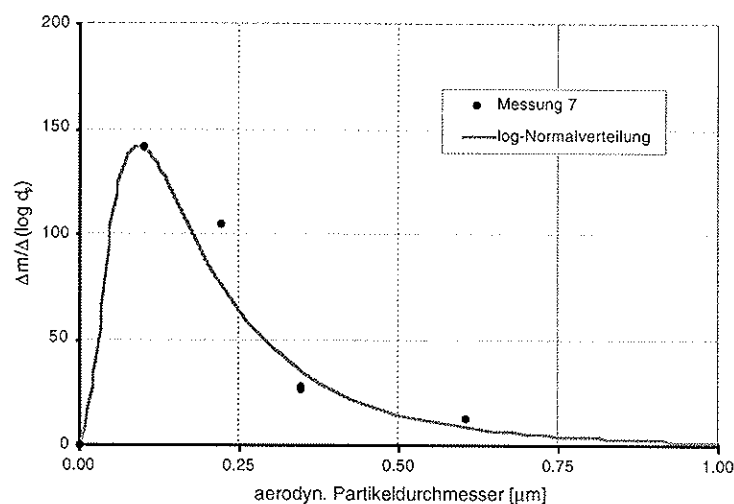


Abbildung 3.5: Dichtefunktion von Flugstaubpartikeln aus der Holzverbrennung in Abhängigkeit des aerodynamischen Partikeldurchmessers

Bemerkungen: Messwerte aus dem Versuch 7; Die Dichtefunktion verläuft durch den Nullpunkt; übrige Bemerkungen siehe Abbildung 3.4.

### 3.3 Versuchsdurchführung

Der benutzte Impaktor ist ein 8-stufiger Andersen-Kaskadenimpaktor aus rostfreiem Stahl mit Loch-Düsen (Andersen 2000 Inc., Mark II Stack Sampler; Abbildung 3.6). Die Impaktion der Partikel erfolgt direkt auf den Stahlplatten ohne Verwendung eines Sammelsubstrates. Vor dem Impaktor befindet sich ein Vorfilter zur Grobstaubabscheidung. Bei den hier durchgeführten Messungen wurden allerdings keine sichtbaren Staubmengen im Vorfilter gefunden, so dass dieser nach einigen Versuchen nicht mehr zum Einsatz kam. Nach der letzten Impaktorplatte befindet sich ein Totalfilter zur Abscheidung der restlichen Partikel. Für das Totalfilter wurden Scheiben aus dem kommerziellen Gewebefilterschlauchmaterial Nextel™ (Produkt der Firma 3M) eingesetzt.

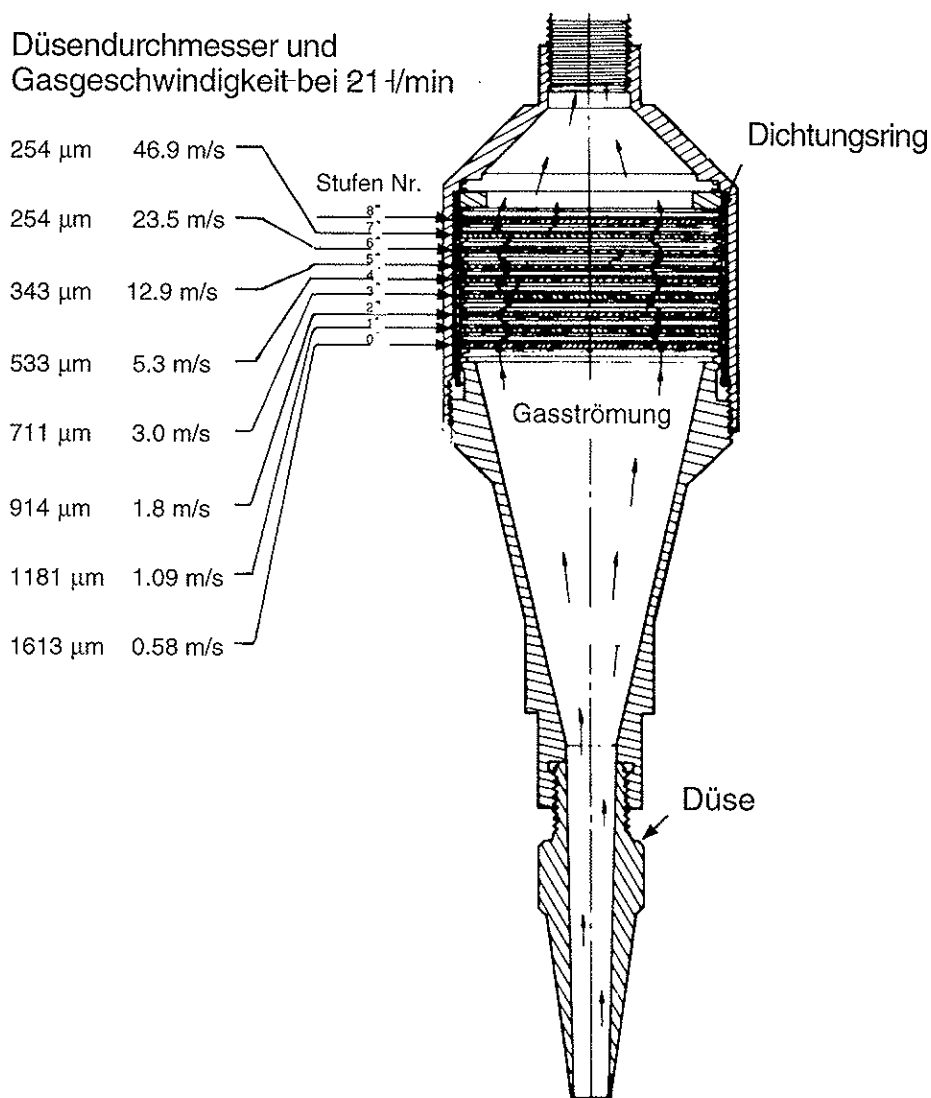


Abbildung 3.6: Andersen Kaskadenimpaktor (Mark II Stack Sampler) ohne Vorfilter (innenliegende Messanordnung mit Probenahmedüse)  
Bemerkung: Beim abgebildeten Impaktor erfolgt die Beaufschlagung der Platten mit staubhaltigem Gas von unten.

In der Regel wird der Impaktor aussenliegend eingesetzt und beheizt. Bei den Messungen an Verbrennungsanlagen wurde der Impaktor auf 120°C beheizt, bei denjenigen an Vergasungsanlagen auf 270°C. Die Impaktionsplatten liegen in der Regel horizontal und die Beaufschlagung mit Gas erfolgt von oben. Dadurch ergibt sich bei einem senkrecht angeordnetem Kamin eine zweifache Krümmung im Ansaugrohr. Bei der innenliegenden Messanordnung steht der Impaktor senkrecht im Kamin und das Gas wird vor der Impaktion nicht umgelenkt. Der Vergleich von zwei Messungen mit innen- und aussenliegender Anordnung zeigte keine signifikanten Unterschiede in den Partikelgrößenverteilungen (Anhang 7.3; [Kleinn 1997]). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Hauptmasse der Partikel im Submikronbereich  $< 1 \mu\text{m}$  liegt und diese Partikel nur eine geringe Tendenz zur Ablagerung im Absaugerohr aufweisen. Die beiden Krümmungen führen demnach zu einem vernachlässigbaren Messfehler.

Bei den Verbrennungsversuchen wird das heiße Abgas nach dem Kaskadenimpaktor in eine Trocknungseinheit geleitet, die aus einem wassergekühlten Kondensator und einer Silikagel-Trockenpatrone besteht. Die Silikagelpatrone führte zu hohen Druckverlusten, was den Absaugevolumenstrom auf ca.  $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  begrenzte. Um im Aerosolbereich der Partikel möglichst viele Klassen messen zu können, ist jedoch ein Absaugevolumenstrom von ca.  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  anzustreben. In der Regel wurde der Silikagel-Trockner daher nicht verwendet. Zur Berechnung des trockenen Absaugevolumens wurde die nach der Kondensation im Abgas enthaltene Restfeuchte berücksichtigt. Dabei wurde nach dem Gaskühler eine Abgastemperatur angenommen. Der durch die Temperaturschätzung verursachte Fehler ist geringer als 1%.

Bei den Vergasungsversuchen wird das heiße Gas nach dem Impaktor durch einen wassergekühlten Kühler in eine Kondensationseinheit geführt. Nach der Wasserdampfkondensation erfolgt die Absorption von Teer- und Kohlenwasserstoffverbindungen in einem organischen Lösungsmittel. Die Absorption dient bei diesen Versuchen zum Schutz der Vakuumpumpe und der Gasuhr.

Das getrocknete oder entfeuchtete Gas wird mit einer Vakuumpumpe angesaugt. Nach der Pumpe gelangt das Gas über ein Rotameter in eine Gasuhr. Die Gasuhr dient zur Volumenstromintegration. Die Abbildung 3.7 zeigt einen Teil der verwendeten Messeinrichtung für die Verbrennungsversuche.

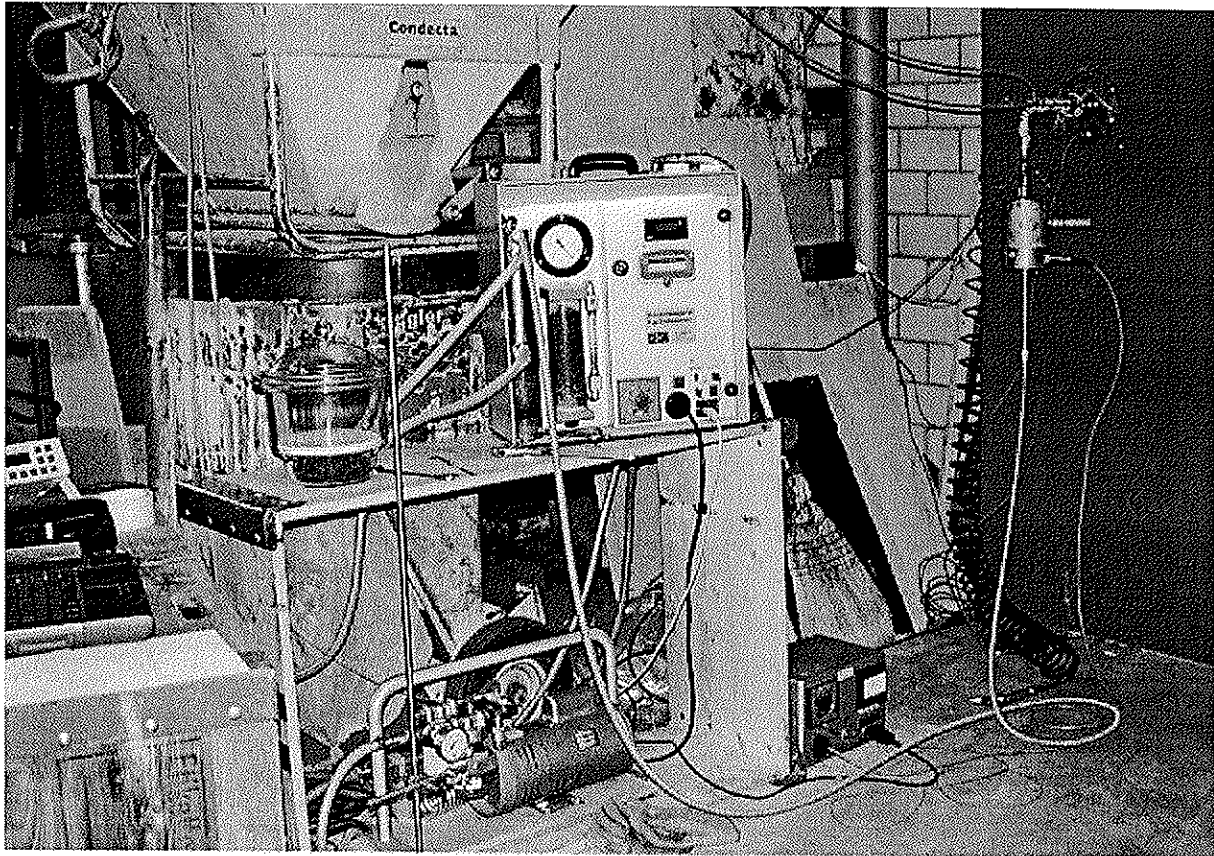


Abbildung 3.7: Messeinrichtung zur Kaskadenimpaktormessung (Foto Verenum)

Die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit erfolgt bei den Verbrennungsversuchen mit einem Prandtl-Rohr (Abbildung 3.8), das in der Nähe der Ansaugdüse des Impaktors im Abgasstrom montiert wurde. Die Abgasgeschwindigkeit  $v$  wird aufgrund der Differenz des statischen und des dynamischen Druckes  $\Delta p$  ( $= p_1 - p_2$ ; s.a. Abbildung 3.8) berechnet:

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

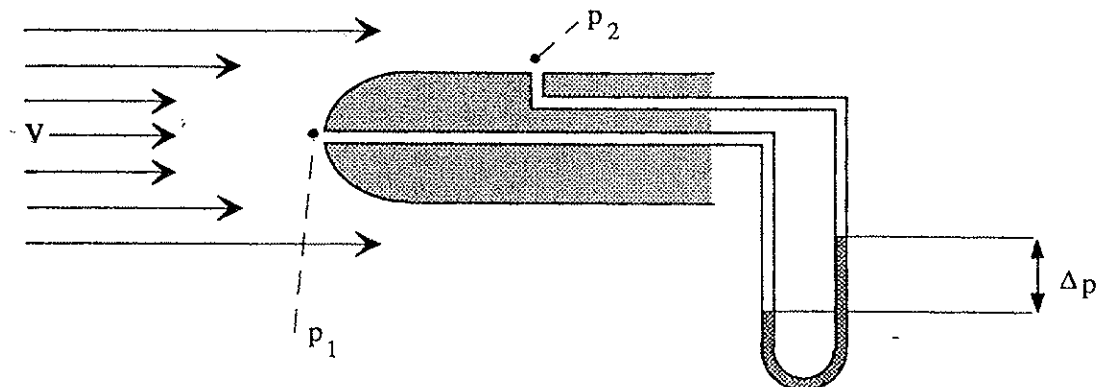


Abbildung 3.8: Prandtl-Rohr (schematisch)

Zur Kontrolle der isokinetischen Absaugebedingungen werden während des Impaktorversuches in regelmässigen Abständen die Abgasgeschwindigkeit, die Abgastemperatur im Kamin sowie die Temperatur und das Volumen des abgesaugten Gases an der Gasuhr gemessen und in eine Computervorlage eingegeben. Bei Abweichungen von der Isokinetik wird die Bypass-Öffnung bei der Vakuumpumpe verändert. Bei den Vergasungsversuchen wird die Absaugegeschwindigkeit aus dem Brennstoffmassenstrom, der Holzgaszusammensetzung und den Kaminabmessungen berechnet.

Die Bestimmung der Abgaszusammensetzung ( $O_2$ , CO,  $CO_2$ , NO) erfolgt mit einem elektrochemischen Abgasmessgerät MADUR GA-50. Die Bestimmung der Holzgaszusammensetzung basiert auf NDIR spektroskopischen Methoden (CO,  $CH_4$  und  $CO_2$ ) und auf dem Wärmeleitfähigkeits- ( $H_2$ ) und dem paramagnetischen Prinzip ( $O_2$ ).

Nach der Probenahme werden die Impaktionsplatten aus dem Impaktorgehäuse entfernt und zum Abkühlen und Trockenhalten in einen Exsikkator gegeben. Anschliessend erfolgt die Auswaage der staubbeladenen Platten auf einer Analysenwaage.

Auf den Impaktorplatten haben sich charakteristische Partikelanhäufungen abgelagert, welche insbesondere für die Partikel im Grössenbereich  $< 1 \mu m$  ausgeprägt sind (Abbildung 3.9). Die Partikel bleiben trotz Verzicht auf ein Haftmittel auf den Platten haften. Typische Stufenbeladungen bei Andersen Impaktoren liegen im Bereich von 0.3 bis 20 mg [Smith et al. 1975]. Höhere Beladungen können zu Verlusten durch Rückprallen oder Wegblasen führen. Bei den hier durchgeführten Versuchen betrug die Beladung auf einer einzelnen Platte maximal 10 bis 20 mg, bei der Altholzverbrennung wurden maximale Beladungen bis 50 mg gefunden.

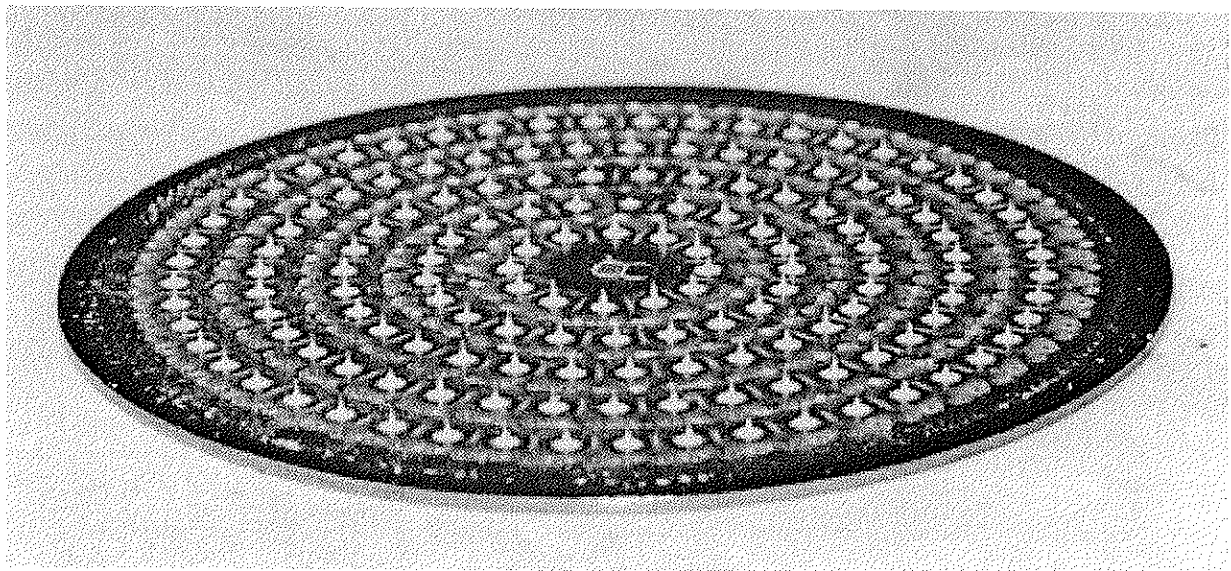


Abbildung 3.9: Impaktierte Flugstaubpartikel aus der Holzverbrennung auf einer Platte des Andersen-Kaskadenimpaktors (Foto Verenum)  
Bemerkungen: Das Bild zeigt Partikel auf der letzten Platte (no. 8) im Kaskadenimpaktor vor dem Totalfilter; Die Partikel weisen einen mittleren aerodynamischen Durchmesser von ca.  $0.4 \mu m$  auf.



### 3.4 Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung

Obwohl die Durchführung einer Impaktormessung relativ einfach und vom apparativen Aufwand her überschaubar ist, sind einige Besonderheiten zu beachten. Hierzu zählen insbesondere die Wahl der Absaugeschwindigkeit und das Vermeiden von Partikelverlusten.

Die Absaugeschwindigkeit bestimmt die Gasgeschwindigkeit in den Düsen und dadurch den Cut off Durchmesser der einzelnen Stufe (Abbildung 3.10).

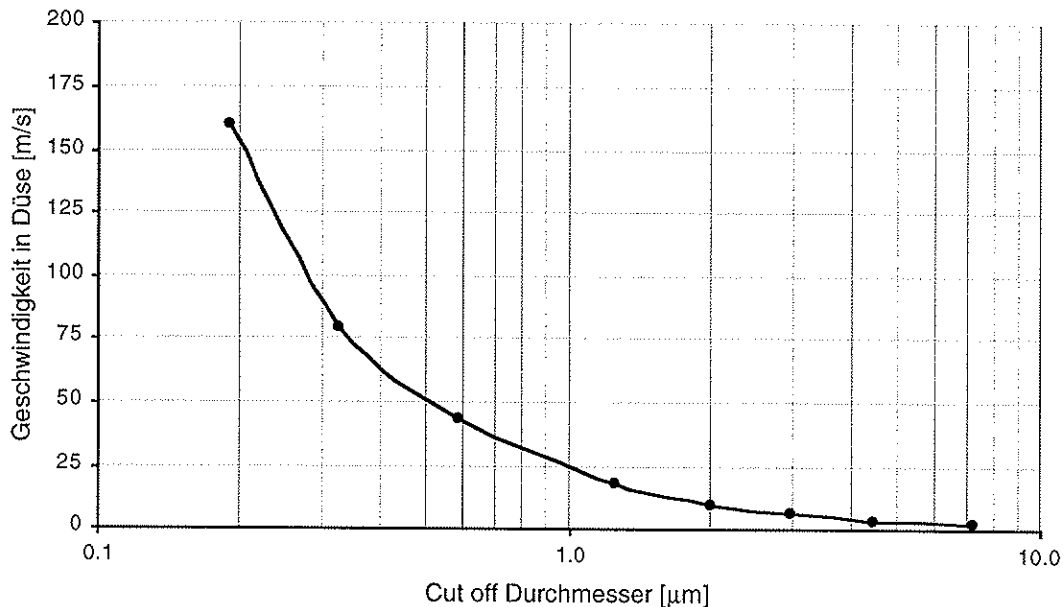


Abbildung 3.10: Zusammenhang zwischen dem Cut off Durchmesser und der Gasgeschwindigkeit in den Düsen für den 8-stufigen Andersen Kaskadenimpaktor  
Bemerkungen: Berechnungsformel siehe Kapitel 3.2; Die Messpunkte entsprechen den Cut off Durchmessern der einzelnen Impaktorstufen; Die grafische Darstellung wurde mit Versuchsdaten aus einer Messung zur Holzverbrennung auf der 450 kW Vorschubrostfeuerung abgeleitet.

Hohe Geschwindigkeiten ermöglichen geringe Cut off Durchmesser und damit eine höhere Auflösung im Submikronbereich  $<1 \mu\text{m}$ , können jedoch auch zum Rückprallen oder Wegblasen von Partikeln auf der Impaktorstufe führen (sog. Blow off Effekt). Partikelverluste können zudem durch Undichtheiten im Impaktor entstehen. Die rückgeprallten oder weggeblasenen Partikel scheiden sich auf dem vorgängigen oder nachfolgenden Stufen oder auf dem Totalfilter nieder. Die Partikelverluste führen zu Partikelgrößenverteilungen, welche entweder bei kleineren oder bei grösseren Partikeldurchmessern erhöhte Massenanteile aufweisen.

Nach [Harris 1977] besteht bei Gasgeschwindigkeiten von mehr als 35 m/s die Gefahr von Partikelverlusten durch Rückprallen oder Wegblasen, sofern die Impaktionsplatten keine Haftmittel aufweisen. Als Haftmittel werden z.B. Fette oder Glasfasermatten verwendet. Bei der Verwendung von Haftmitteln soll die Geschwindigkeit nicht mehr als 65 m/s betragen. Im Temperaturbereich über  $100^\circ\text{C}$  können jedoch keine Fette mehr verwendet werden. Allerdings wurden auch bei der Impaktion auf haftmittelfreien Stahlplatten bei Temperaturen von  $400^\circ\text{C}$  und Gasgeschwindigkeiten von rund 60 m/s keine nennenswerten Partikelverluste beobachtet [Newton et al. 1982]. Vermutlich sind für das Auftreten des Blow off Effektes auch die Partikeleigenschaften von Bedeutung.

Die Betriebsanleitung für den verwendeten Andersen Impaktor enthält Nomogramme für Geschwindigkeiten bis ca. 60 m/s, so dass bis zu dieser Geschwindigkeit keine nennenswerten Verluste zu erwarten sind. Bei den hier durchgeführten Versuchen betragen die Geschwindigkeiten in der letzten Impaktionsstufe typischerweise jedoch rund 100 m/s, in Einzelfällen sogar bis 160 m/s. Auf der zweitletzten Stufe betragen die Geschwindigkeiten rund die Hälfte davon, also rund 50 m/s. Eine Gasgeschwindigkeit von 100 m/s auf der letzten Impaktorstufe entspricht einem Absaugevolumenstrom von rund 2.5 m<sup>3</sup>/h (feuchtes Gas bei Betriebsbedingungen) bzw. 1.5 Nm<sup>3</sup>/h (trockenes Gas bei Normbedingungen).

Grund für die Wahl von höheren als empfohlenen Gasgeschwindigkeiten beziehungsweise Absaugevolumenströme waren Hinweise aus der Literatur, dass die Partikel aus der Holzverbrennung vor allem im Grössenbereich <1 µm liegen. Gemäss Abbildung 3.10 sind hierzu jedoch Gasgeschwindigkeiten von mindestens 25 m/s erforderlich. Für mehrere Partikelgrössenklassen unterhalb vom 1 µm sind daher hohe Gasgeschwindigkeiten von >100 m/s in den letzten Impaktorstufen zwingend.

Nach einem Vorschlag von [Markowski 1984 und 1987] ist die Überprüfung von Partikelverlusten durch Verwendung von zwei identischen, in Serie geschalteten Impaktorstufen möglich. Zur Bestimmung der möglichen Partikelverluste wurden daher einige Versuche mit seriell angeordneten Stufen bei unterschiedlichen Düsengeschwindigkeiten durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Abgas einer Unterschubfeuerung nach dem Zyklon. Die Versuchsergebnisse waren allerdings schlecht reproduzierbar und ergaben keine plausiblen Werte. Bei früheren „normalen“ Impaktormessungen wurden hingegen in einigen Fällen verschiedene Absaugegeschwindigkeiten gewählt, so dass durch ein Vergleich der entsprechenden Partikeldichtefunktionen möglich ist (Abbildung 3.11). Der Wert der Partikeldichte bei der höchsten Düsengeschwindigkeit steigt mit zunehmender maximaler Düsengeschwindigkeit nicht an, was darauf hindeutet, dass bei der untersuchten Staubart selbst bei Geschwindigkeiten von mehr als 100 m/s kein dramatischer Blow off Effekt auftritt. Allerdings werden verschiedene Formen der Partikeldichtefunktionen beobachtet, was möglicherweise auf die Bauart der Feuerung oder auf die Feuerungseinstellung zurückzuführen ist.

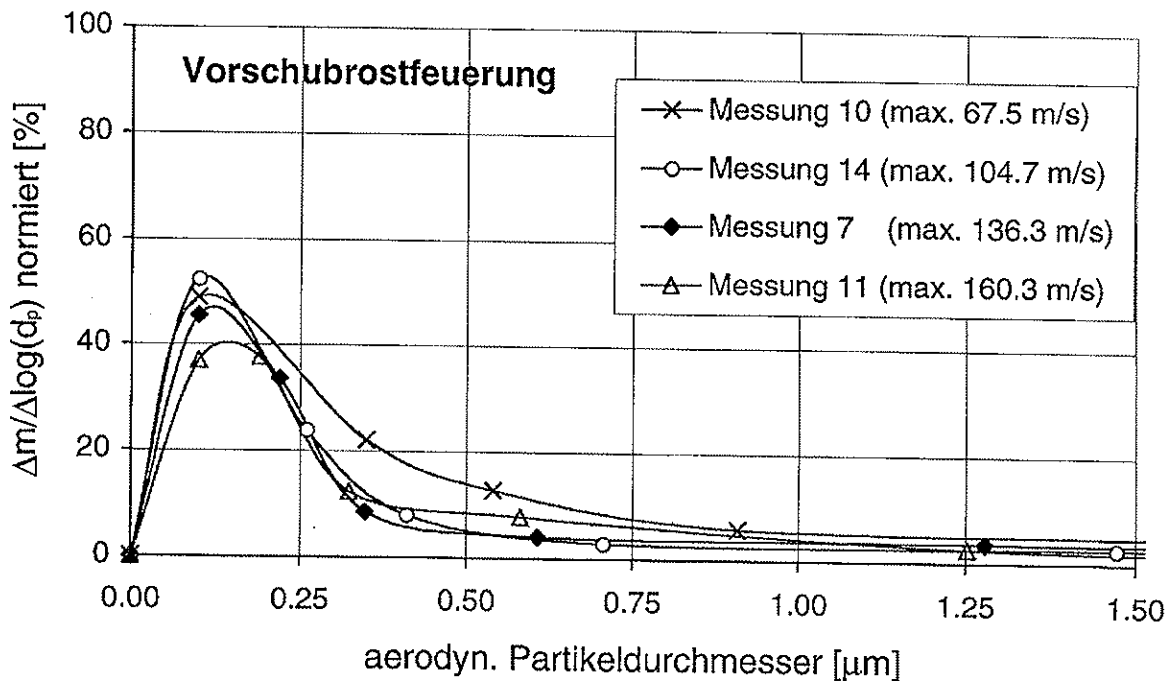
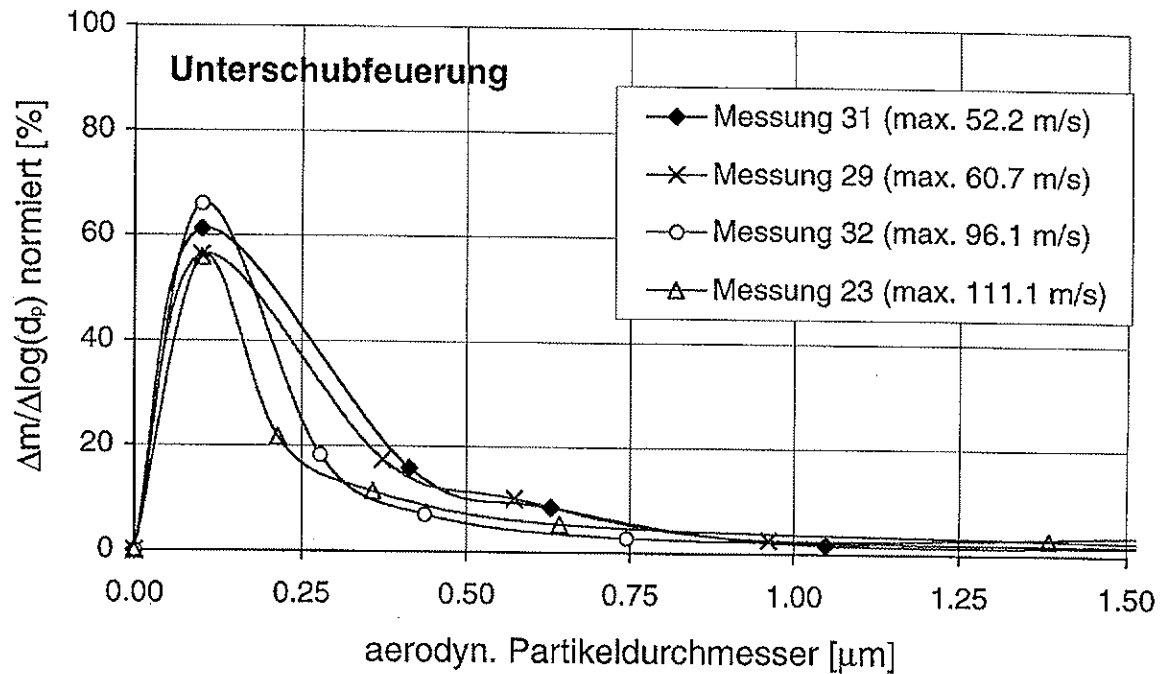


Abbildung 3.11: Partikeldichtefunktionen aus Impaktormessungen bei verschiedenen Absauge- bzw. Düsen-  
geschwindigkeiten in einer 250 kW-Unterschubfeuerung mit  $\text{NO}_x$ -Reduktionskammer (Low- $\text{NO}_x$ , oben) und einer 450 kW-Vorschubrostfeuerung (unten) bei Betrieb mit naturbelassenem Holz. Die Einzelwerte der Partikeldichten sind auf den Gesamtstaubgehalt bezogen. Die Approximation der Dichtefunktionen erfolgt anhand einer Polynomfunktion. Die höchsten Düsen-  
geschwindigkeiten werden auf der letzten Impaktorstufe bei einem Cut off von ca.  $0.2 \mu\text{m}$  er-  
reicht. Die Ein- und Auswaagefehler der Impaktorplatten führen bei Partikeldurchmessern von  
ca.  $0.7 \mu\text{m}$  zu einem Fehler der Partikeldichtefunktion von maximal ca. 20%.

## 4 Versuchsanlagen

### 4.1 Vorschubrostfeuerung

Bei Rostfeuerungen gelangt der Brennstoff über ein Förderaggregat auf einen Rost und wird durch die Vor- und Rückwärtsbewegungen der Rostelemente langsam vorwärts befördert. Im ersten Rostbereich erfolgt die Trocknung des Brennstoffs, im mittleren die Vergasung und im letzten der Ausbrand der Holzkohle. Am Rostende erfolgt eine automatische Entaschung. Rostfeuerungen sind auch für aschereiche Brennstoffe geeignet und sie werden als Gleich-, Mittel- und Gegenstromfeuerungen ausgeführt. Die Rostfeuerung ermöglicht eine optimale Anpassung an das Abbrandverhalten des Brennstoffs, indem Anlagen die Primärluft entsprechend dem Luftbedarf in verschiedenen Zonen unter dem Rost zugeführt werden kann. Die Sekundärluft wird über dem Rost mit den brennbaren Gasen vermischt. Nach dem Wärmetauscher strömt das Abgas durch einen Trägheitsentstauber und gelangt über den Kamin in die Atmosphäre.

Die untersuchte Vorschubrostfeuerung ist als Gegenstromfeuerung mit einer Kesselleistung von 450 kW ausgeführt (Abbildung 4.1). Zusätzlich weist die Feuerung eine nachgeschaltete Reaktionskammer zur Entstickung nach dem SNCR-Prinzip (=Selective Non Catalytic Reduction) auf. Beim Anlagenbetrieb mit Entstickung wird unmittelbar vor der nachgeschalteten heißen Denoxkammer ein Reduktionsmittel (z.B. Ammoniak oder Harnstofflösung) eingedüst. Die Impaktorversuche erfolgten jedoch immer ohne Entstickungsbetrieb. Im Vergleich zu einer konventionellen Rostfeuerung unterscheidet sich die Anlage durch die lange Verweilzeit der Gase in der heißen Brennkammer. Die CO-Gehalte im Abgas und die Restkohlenstoffgehalte im Staub sind daher sehr gering.

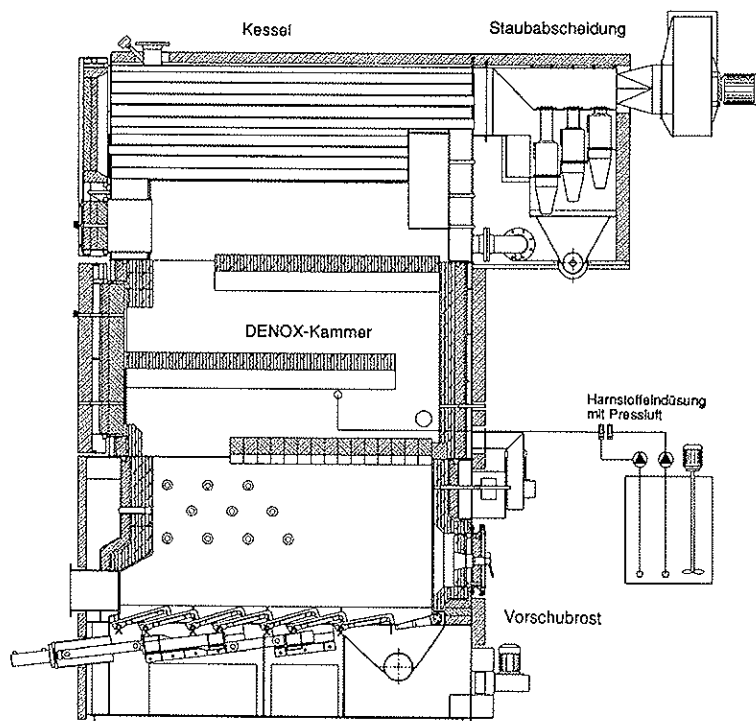


Abbildung 4.1: 450 kW Vorschubrostfeuerung mit SNCR-Entstickung der Firma Schmid AG in Eschlikon

## 4.2 Unterschubfeuerung

Bei Unterschubfeuerungen wird der Brennstoff von unten in eine Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft in die Retorte eingeblasen. Dort erfolgen die Trocknung und Vergasung des Brennstoffs sowie die Oxidation der Holzkohle. Um die brennbaren Gase vollständig zu oxidieren, wird die Sekundärluft vor dem Eintritt in die heisse Nachbrennkammer mit den brennbaren Gasen vermischt. Anschliessend geben die ausgebrannten Gase im Wärmetauscher ihre Wärme ab, passieren den Trägheitsentstauber und gelangen über das Kamin in die Atmosphäre.

Die untersuchte Unterschubfeuerung ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Kesselleistung ist bei Feuerungsbetrieb ohne Abgasrückführung auf 250 kW ausgelegt. Zur besseren Kontrolle der Feuerraumtemperatur ist die Rückführung von Abgas in die primäre Verbrennungszone möglich. Hierzu wird das Abgas nach dem Kessel und vor dem Multizyklonabscheider abgezogen und in den Primärluftkasten zurückgeführt, wo eine Vermischung mit der Primärluft stattfindet. Bei Abgasrückführung sinkt die Kesselleistung leicht ab. Die Mengenregelung des rückgeführten Abgases erfolgt über einen Ventilator mit verstellbarer Drehzahl und ansteuerbaren Stellklappen. Der Unterdruck im Feuerraum wird durch den drehzahlgeregelten Abgasventilator aufrecht erhalten. Die Sekundärluft wird vorgewärmt, indem sie zur Kühlung der hinterlüfteten Feuerraumwände im Bereich der Retorte verwendet wird. Die Anlage ist von einer SPS gesteuert, die Verbrennungsoptimierung erfolgt mittels  $\lambda$ -Regelung.

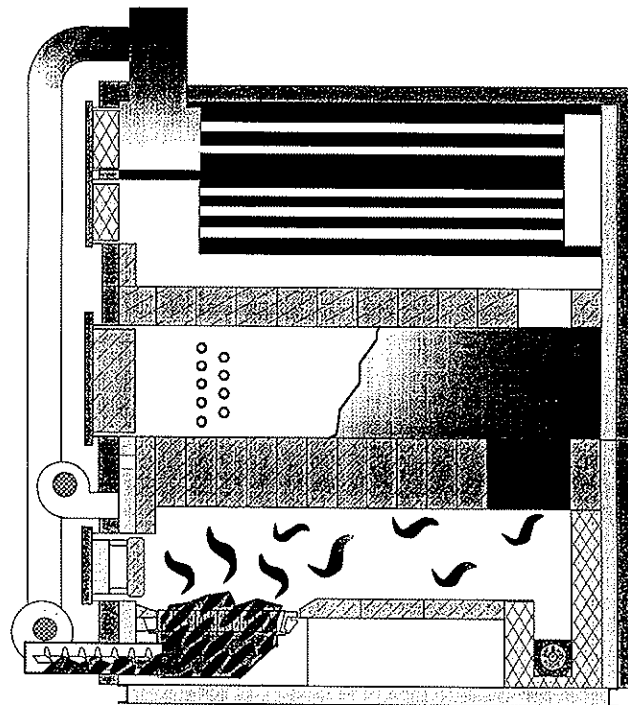


Abbildung 4.2: 250 kW Unterschubfeuerung mit Reduktionskammer für Luftstufung und Möglichkeit zur Abgasrückführung (Low NO<sub>x</sub>) der Firma Tiba-Müller AG in Balsthal

## 4.3 Gleichstrom-Festbettvergaser

Der untersuchte absteigende open top Gleichstromvergaser ist zweischalig aufgebaut mit einer äusseren Isolation (Abbildung 4.3). Der Reaktorteil besteht aus einem zylindrischen Rohr, welches im oberen Teil aus Stahl gefertigt ist. Der untere Teil ist ein Stahlzylinder mit einer keramischen, nach unten konisch verlaufenden Auskleidung.

Die Vergasungsluft wird zu ca. 2/3 von oben zugeführt, während der Rest durch sechs seitliche Düsen einströmt. Der Brennstoff gelangt über Schneckenförderer in den oberen, offenen Reaktorteil. Auf dem Weg nach unten erfährt der Brennstoff eine stetige Temperaturerhöhung. Im Bereich der seitlichen Luftzufuhr bildet sich ein Glutbett aus. In diesem Bereich erfolgt die thermische Umsetzung der Pyrolysegase zu Brenngas und der Ausbrand der Holzkohle. Die Energie zur Aufrechterhaltung der endothermen Prozesse Trocknung, Pyrolyse und Pyrolysegascracking wird durch Verbrennen eines Teils des Brennstoffes sichergestellt.

Die heissen Gase aus dem unteren Reaktorteil gelangen über einen Zyklon und ein seitliches Rohrstück nach oben. Ein Wärmetauscher überträgt einen Teil der fühlbaren Wärme im Holzgas an das Brennstoffbett im oberen Reaktorteil. Das Holzgas verlässt den Vergaser bei ca. 450°C und gelangt in einen Nasswäscher zur Teer- und Partikelabscheidung. Der Anlagenbetrieb wird von einer SPS gesteuert und geregelt.

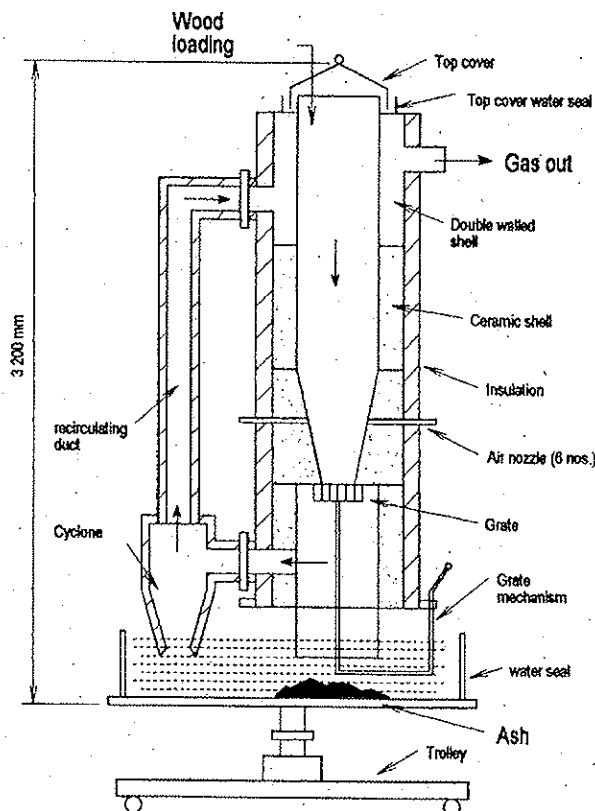


Abbildung 4.3: Absteigender open top Gleichstromvergaser von IISc/Dasag [Giordano et al. 1996]  
Bemerkungen: die thermische Vergaserleistung beträgt rund 270 kW in Bezug auf den Brennstoffmassenstrom; IISc = Indian Institute of Science in Bangalore, Indien (Arbeitsgruppe Prof. H.S. Mukunda).

## 4.4 Labor-Wirbelschichtvergaser

Wirbelschichtverfahren zeichnen sich durch einen guten Stoff- und Wärmeaustausch aus. Sie unterscheiden sich von Festbettverfahren wie z.B. einem Festbettvergaser, einer Rost- oder Unterschufbeuerung dadurch, dass der Brennstoff im Vergasungs- bzw. Verbrennungsmittel fluidisiert wird. Die für die Vergasung notwendige Energie wird in der Regel wie bei Festbettvergasern durch Verbrennen eines Teils des Brennstoffes aufgebracht (Vergasung mit direkter Wärmeübertragung). Mit dem Laborreaktor am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen wird das Verhalten einer Grossanlage simuliert (Abbildung 4.4). Der Anlagenbetrieb erfolgt im Bereich eines stationären Wirbelschichtreaktors. In der Versuchsanlage sind Verweilzeiten von mehreren Sekunden unter Vergasungsbedingungen möglich, so dass ein annähernder Gleichgewichtszustand erwartet werden kann. Zur Vermeidung von Energieverlusten und Temperaturgradienten ist die gesamte Anlage mit einer elektrischen Zusatzbeheizung versehen. Bei trockenem Sägemehl kann die Brennstoffmenge zwischen 2 und 30 kg/h variiert werden, was einer thermischen Leistung von 10 bis 150 kW entspricht. Die Beschickung kann eine Brennstoffkörnung von max. 6 mm verarbeiten und fördern. Der Durchmesser des Reaktors beträgt 21 cm, die Gesamthöhe 6.7 m. Der obere Reaktorteil von rund 4 m Länge ist als „Freeboard“ zur Untersuchung des Verweilzeitverhaltens ausgebildet. Die wichtigsten Versuchsparemeter sind:

- Vergasungstemperatur und Temperaturprofil im oberen Reaktorteil
- Fluidisierungsgeschwindigkeit und Vergasungsmittel
- Brennstoffmassenstrom
- Bettmaterial und -menge

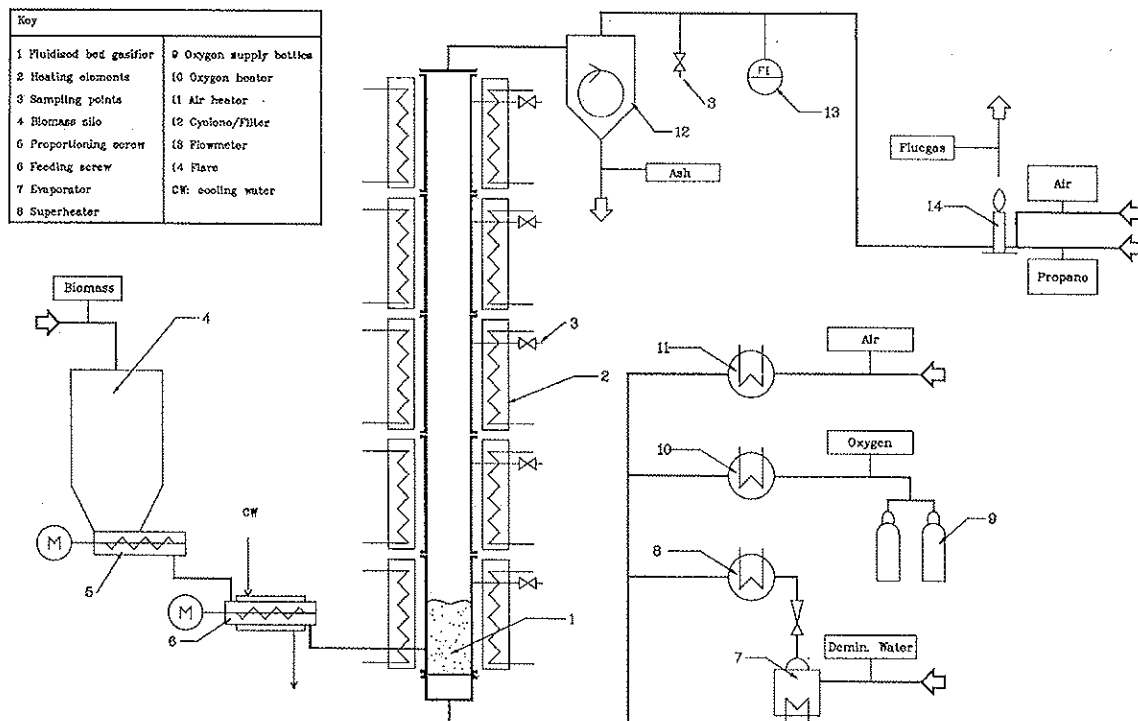


Abbildung 4.4: Labor-Wirbelschichtvergaser am Paul Scherrer Institut (PSI) [De Sousa et al.1994]

## 5 Messergebnisse

### 5.1 Einfluss des Brennstoffs auf die Partikelgrößenverteilung

Zur Untersuchung des Brennstoffeinflusses auf die Partikelgrößenverteilung im Flugstaub werden in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung (Kapitel 4.1) eine Reihe von Impaktormessungen durchgeführt. Folgende Brennstoffe gelangen zum Einsatz:

- Naturbelassene Waldhackschnitzel
- Gemisch aus Hackschnitzel und Rinde
- Spanplatten
- Altholz
- Gras

Soweit möglich erfolgen alle Impaktormessungen bei vergleichbaren Verbrennungsbedingungen und Feuerungsleistungen. Bei einem Brennstoffwechsel wird die Feuerung vor der ersten Impaktormessung für jeweils einige Stunden mit dem zu untersuchenden Brennstoff betrieben, um sicherzustellen, dass die Staubbeladung im Abgas nicht vom vorangegangenen Brennstoff beeinflusst ist. Üblicherweise erfolgen die Impaktormessungen im Abgas nach dem Multizyklon.

Die Partikelgrößenverteilungen in den Flugstäuben aus der Verbrennung verschiedener Biomassebrennstoffe sind unterschiedlich (Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2). Auffallend ist jedoch, dass mit Ausnahme des Gemisches von Holz mit Rinde ausschliesslich Partikel im Submikronbereich gefunden werden und die Partikelgrößenverteilungen monomodal sind. Selbst wenn die Impaktormessung im Rohgas vor dem Zyklon erfolgt (siehe Anhang 7.2), werden praktisch keine Partikel über 10  $\mu\text{m}$  gefunden. Der gute Gasausbrand führt zu Partikeln, die weiss oder bei Altholz leicht gräulich gefärbt sind.

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz und Gras liegen die Hauptmassenanteile der Partikel im Bereich  $< 0.25 \mu\text{m}$ , bei Spanplatten im Bereich  $< 0.37 \mu\text{m}$  und bei Altholz zwischen 0.2 und 0.35  $\mu\text{m}$ .

Das Verbrennen eines Gemisches von Holz mit Rinde (ca. 1:1) führt zu einer bimodalen Partikelgrößenverteilung (Abbildung 5.1). Die beiden Maxima der Partikelmassen liegen im Bereich  $< 0.25 \mu\text{m}$  sowie im Bereich zwischen 3.2 und 4.7  $\mu\text{m}$ . Rinde ist der einzige untersuchte Brennstoff, bei dessen Verbrennung eine bimodale Partikelgrößenverteilung beobachtet wird. Die gefundenen Gesamtstaubgehalte sind deutlich geringer als aufgrund von Literaturwerten in österreichischen Rindenfeuerungen [Oberberger und Biedermann 1996] vermutet wurde.

Mit Ausnahme von Rinde weisen bei allen untersuchten Brennstoffen mehr als 80 Gewichtsprozent der Partikel einen Durchmesser  $< 1 \mu\text{m}$  auf (Tabelle 5.1).



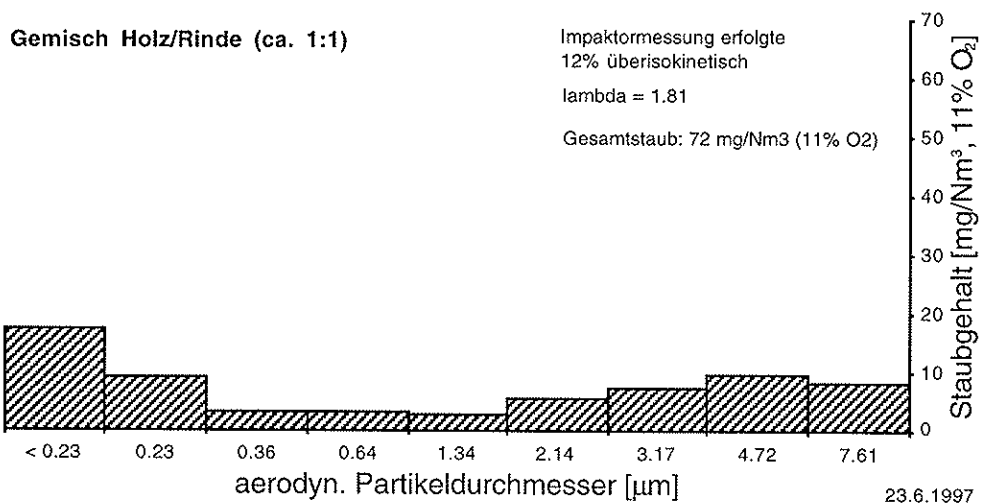
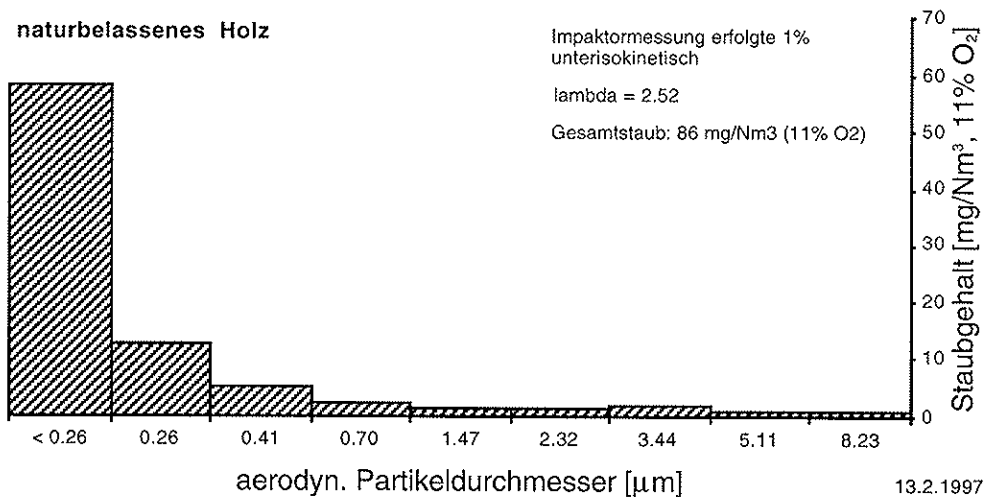


Abbildung 5.1: Partikelgrößenverteilungen im Abgas bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz (oben) und einem Gemisch aus Holz und Rinde (unten) in einer Vorschubrostfeuerung  
Bemerkungen: Der Feuerungsbetrieb erfolgt in beiden Versuchen bei Vollast; Die Impaktormessungen erfolgten vor dem Zyklon.

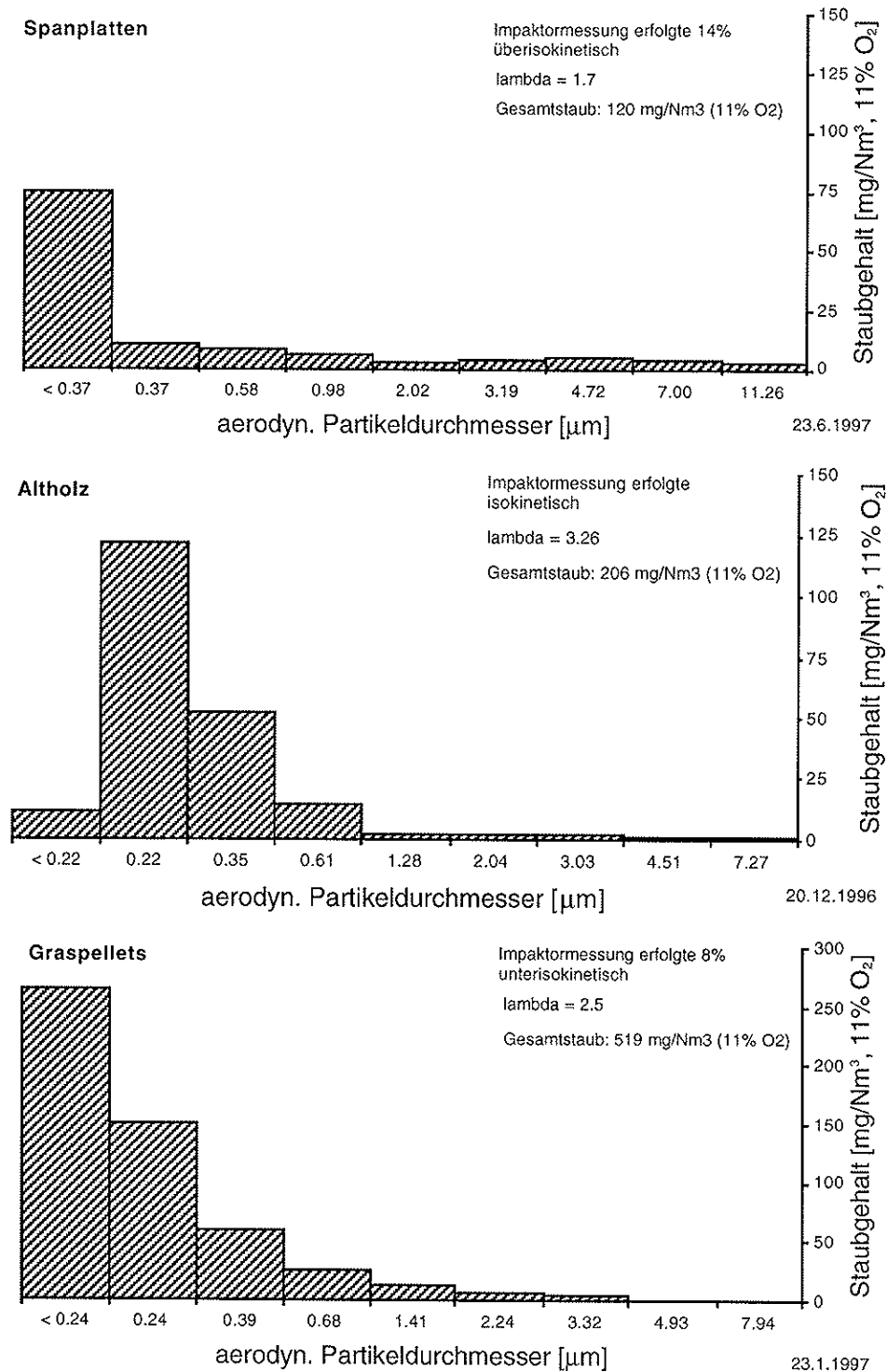


Abbildung 5.2: Partikelgrößenverteilungen im Abgas bei der Verbrennung von Spanplatten, Altholz und Gras in einer Vorschubrostfeuerung  
 Bemerkungen: Die Feuerung wird in den drei Versuchen bei Vollast betrieben; die Impaktormessungen bei Altholz und Gras erfolgten im Abgas nach, diejenige bei Spanplatten im Abgas vor Zyklon; die y-Achsenkalierung bei der Messung von Gras ist von den beiden anderen Grafiken verschieden.

Brennstoff	#	$\lambda$	CO	NO <sub>x</sub>	Staubgehalt		
		[ - ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	< 1 $\mu$ m [mg/Nm <sup>3</sup> ]	
Naturbelassenes Holz (u = 88%)	7	2.42	<5	247	85	80	(94%)
	8	2.72	<5	235	78	74	(95%)
	9	2.91	<5	235	96	92	(96%)
	10	2.37	<5	237	95	90	(95%)
	14 *	2.52	<5	213	86	78	(91%)
Holz/Rinde-Gemisch (ca. 1:1) (u = 104%)	15 *	1.81	<5	160	65	32	(49%)
Spanplatten (u = 59%)	17 *	2.37	<5	438	91	80	(88%)
	19 *	1.70	<5	165	113	97	(86%)
	21 *	1.92	<5	211	127	106	(83%)
Altholz (u = ca. 30%)	1	2.34	<5	338	210	206	(98%)
	2	3.18	<5	385	213	210	(99%)
	3	3.26	<5	342	206	199	(97%)
	4	2.23	<5	467	207	199	(96%)
Gras (u = 11%)	5	2.50	<5	485	519	497	(96%)
	6	2.79	<5	516	608	577	(95%)

Tabelle 5.1: Verbrennungsbedingungen und Staubgehalte bei der Verbrennung verschiedener Biomassebrennstoffen in einer Vorschubrostfeuerung bei vergleichbaren Betriebsbedingungen  
Bemerkungen: Brennstoffeuchte u mit Bezug auf atro Brennstoff; CO, NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>, als NO<sub>2</sub>) und Staubgehalte mit Bezug auf 11% O<sub>2</sub>; # = Versuchs-Nr.; Die Impaktormessungen erfolgen i.d.R. im Abgas nach dem Zyklon, Messungen im Abgas vor dem Zyklon sind mit \* bezeichnet.

Der hohe Aerosolanteil stellt erhöhte Anforderungen bei der Abgasreinigung, da z.B. Trägheitsentstauber wie Multizyklone für Partikel  $< 5 \mu\text{m}$  nur noch sehr geringe Abscheidegrade aufweisen (z.B. [Fritz et al. 1990]; s.a. Anhang 7.2).

Der Aerosolanteil bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Altholz und Gras beträgt mehr als 95%, bei der Spanplattenverbrennung rund 85%. Bei der Verbrennung eines Gemisches von naturbelassenem Holz mit Rinde finden sich hingegen nur rund 50% der Partikel im Aerosolbereich. Zudem ist der Gesamtstaubgehalt signifikant geringer. Die Entstaubung eines Abgases aus der Verbrennung von Rinde oder rindenreichem Holz stellt daher deutlich geringere Anforderung an den Staubabscheider als z.B. diejenige aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Die höchsten Aerosolmengen werden bei der Grasverbrennung gefunden, die geringsten bei der Verbrennung des Gemisches aus Holz und Rinde. Zwischen dem geschätzten Aschegehalt im Brennstoff und der emittierten Gesamtstaubmenge wird ein annähernd linearer Zusammenhang vermutet (Abbildung 5.3).

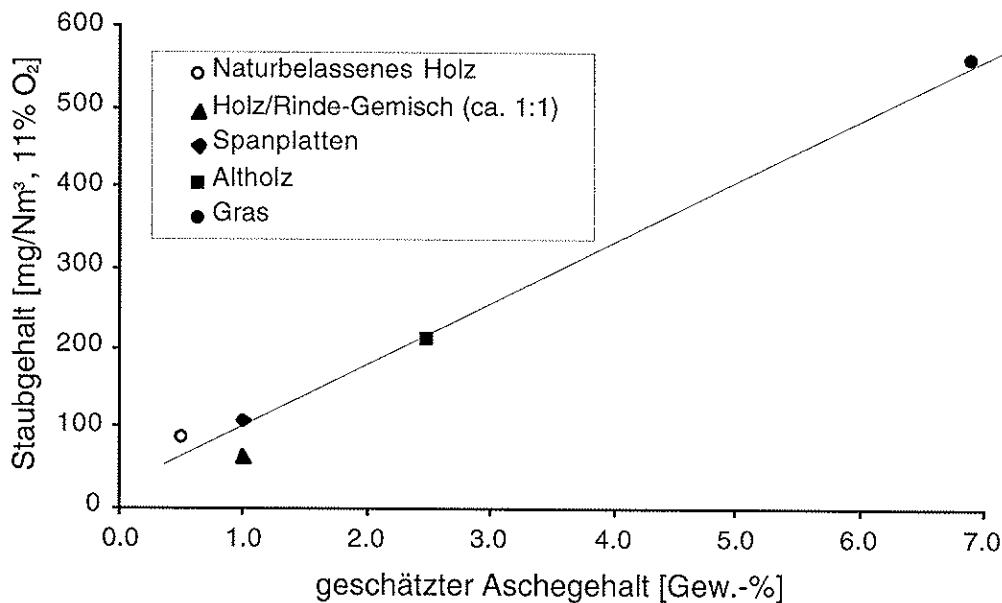


Abbildung 5.3: Mittlere Gesamtstaubgehalte in Abhängigkeit der Aschegehalte bei der Verbrennung von verschiedenen Biomassen auf einer Vorschubrostfeuerung bei vergleichbaren Feuerungseinstellungen. Staubgehalt als Mittelwerte mit Bezug als 11 Vol.-% O<sub>2</sub>, Aschegehalte geschätzt.

Der Anlagenbetrieb erfolgt dabei jeweils bei vergleichbaren Feuerungseinstellungen. Bei unterschiedlichen Feuerungseinstellungen, insbesondere bei Abgasrückführung, werden jedoch bei gleichem Brennstoff unterschiedliche Gesamtstaubgehalte beobachtet (Kapitel 5.2).

## 5.2 Einfluss der Feuerungseinstellung auf die Partikelgrößenverteilung

In einer 250 kW Unterschubfeuerung (Kapitel 4.2) wurde der Einfluss der Feuerungseinstellung untersucht. Die Feuerungs- und Verbrennungseinstellungen lassen sich auf der untersuchten Feuerung in einem breiten Bereich variieren. Insbesondere kann die primäre Verbrennungsluftmenge in der Retorte bis auf eine Luftüberschusszahl  $\lambda_{\text{prim}}$  von ca. 0.4 reduziert werden. Zudem ist die Rückführung von Abgas in die primäre Verbrennungszone möglich. Als Brennstoff gelangen naturbelassene Waldhackschnitzel mit einer Feuchte von 22% atro zum Einsatz. Sämtliche Impaktormessungen wurden auf dieser Anlage im Abgas nach dem Multizyklon durchgeführt. Impaktormessungen im Abgas vor und nach dem Zyklon haben bei der untersuchten Rostfeuerung keine signifikanten Unterschiede gezeigt (Kapitel 7.2).

Insgesamt wurden bei unterschiedlichen Feuerungseinstellungen acht Messungen durchgeführt. Mit Ausnahme des Gesamtstaubgehaltes werden nahezu deckungsgleiche Verteilungen gefunden (Anhang 7.1). Wie bei den Versuchen in der Vorschubrostfeuerung sind die Partikelgrößenverteilungen monomodal und der aerosolförmige Partikelanteil beträgt mehr als 90%. Der Hauptanteil der Partikel liegt im Bereich  $< 0.25 \mu\text{m}$ . Der gute Gasausbrand führt zu weissen Partikeln auf den Impaktorstufen.

Bei vergleichbaren Feuerungseinstellungen unterscheiden sich die in der Unterschubfeuerung gefundenen Partikelgrößenverteilungen (Abbildung 5.4) nur unwesentlich von denjenigen in der Vorschubrostfeuerung.

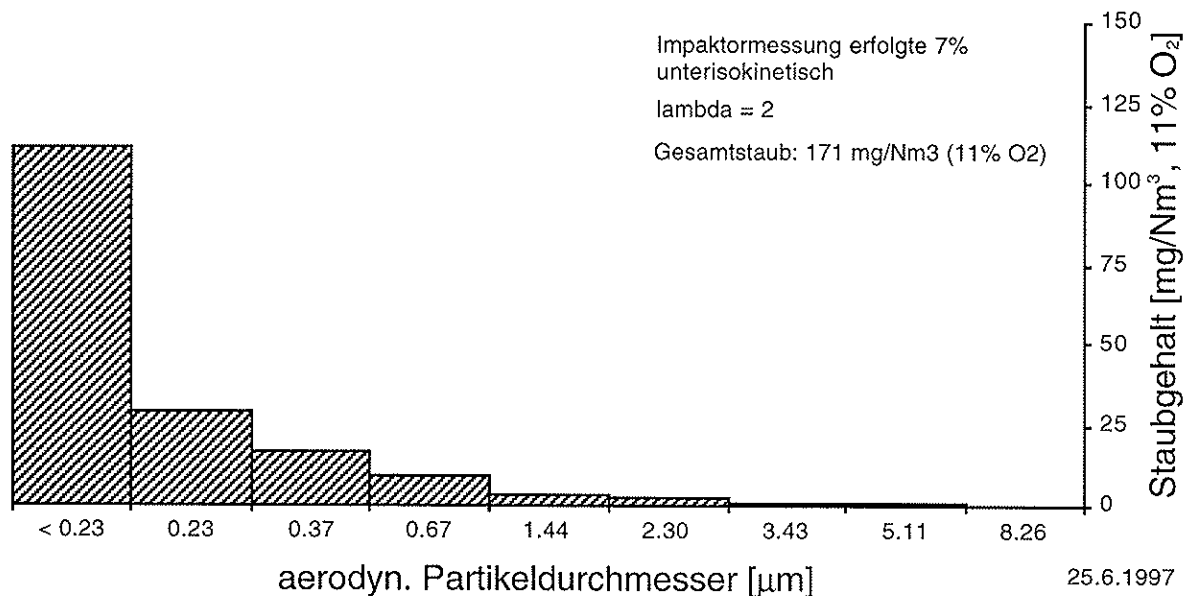


Abbildung 5.4: Beispiel einer Partikelgrößenverteilung im Abgas nach dem Zyklon bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in einer 250 kW Unterschubfeuerung  
 Bemerkungen: Versuch Nr. 24; Feuerungsbetrieb ohne Low NO<sub>x</sub> und Abgasrückführung.

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 5.2 ist ersichtlich, dass die Rezirkulationsrate  $R$  (Masse rückgeführtes Abgas in Bezug auf gesamte Verbrennungsluftmenge) und möglicherweise auch die Primärluftzahl die Gesamtstaubgehalte beeinflussen.

Bei den vorliegenden Betriebsbedingungen kann in der untersuchten Feuerung mit Abgasrückführung (AGR) der Gesamtstaubgehalt bei gleicher Feuerungsleistung von maximal ca. 110 mg/Nm<sup>3</sup> (ohne AGR, Versuch 30) bis auf ca. 30 mg/Nm<sup>3</sup> (Versuch 29) vermindert werden (Staubwerte mit Bezug auf 11 Vol.-% O<sub>2</sub>). Abgasrückführung wird üblicherweise zur besseren Kontrolle der Rosttemperaturen bei Low NO<sub>x</sub>-Betrieb verwendet. Bei einer Rezirkulationsrate  $R$  von mehr als 30% ist bei der untersuchten Unterschubfeuerung und bei naturbelassenem Holz ein Gesamtstaubgehalt nach Zyklon von rund 50 mg/Nm<sup>3</sup> zu erwarten. Für andere Brennstoffe wie Spanplatten, Altholz oder Gras werden jedoch höhere Staubwerte erwartet.

Versuch	Leistung [kW]	$R$ [%]	$\lambda_{\text{primär}}$ [–]	$\lambda_{\text{tot}}$ [–]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Gesamtstaub [mg/Nm <sup>3</sup> ]
23	203	0	0.7	1.6	11	144	162
24	174	0	1.0	2.0	14	167	171
25	161	0	1.3	2.3	18	213	70
26	195	31	0.7	1.6	19	150	57
27	197	30	0.7	1.6	20	181	49
28	189	27	0.4	1.6	18	163	45
29	122	38	0.7	1.6	10	148	28
30	138	0	0.7	1.6	21	119	112

Tabelle 5.2: Feuerungseinstellungen, Ausbrand und Gesamtstaubgehalte bei der Verbrennung von naturbelassenen Waldhackschnitzeln in einer 250 kW Unterschubfeuerung  
Bemerkungen:  $R$  = Rezirkuliertes Abgas über Verbrennungsluft (Masse rückgeführtes Abgas in Bezug auf gesamte Verbrennungsluftmenge); CO, NO<sub>x</sub> und Gesamtstaubgehalte mit Bezug auf 11 Vol.-% O<sub>2</sub>; Feuerungsleistung berechnet aus Brennstoffheizwert, Abgasgeschwindigkeit, Temperatur und Luftüberschuss  $\lambda_{\text{tot}}$ ; Messung 27 erfolgte nach ca. 15 Stunden Anlagenbetrieb mit gleichbleibender Feuerungseinstellung.

Aufgrund der vorliegenden Versuche kann der Einfluss der Primärluftzahl nicht zweifelsfrei gezeigt werden. Auffallend ist jedoch, dass bei einer Primärluftzahl von 1.3 signifikant geringere Gesamtstaubgehalte beobachtet werden als z.B. bei einer Primärluftzahl von 0.7 oder 1.0 (Versuche 23 bis 25, ohne AGR). Hohe Primärluftzahlen sind jedoch nicht erwünscht, da dadurch kein Low NO<sub>x</sub>-Betrieb möglich ist und der Kesselwirkungsgrad absinkt. Als technisches Verfahren zur Minimierung der Gesamtstaubemissionen fallen hohe Primärluftzahlen daher ausser Betracht.

Die Gesamtstaubgehalte sind bei sonst gleichen Betriebsbedingungen zudem von der Feuerungsleistung abhängig (Versuch 23, 30).

### 5.3 Partikelgrößenverteilung bei der Holzvergasung in einem Gleichstromvergaser

In einem 270 kW open top Festbettvergaser nach dem Gleichstromprinzip (Kapitel 4.3) wurde im heißen Rohgas eine Impaktormessung durchgeführt. Das Rohgas weist an der Probenahmestelle eine Temperatur von rund 500 °C auf. Der Impaktor wird auf eine Temperatur von 250°C beheizt. Die Vergasung erfolgt bei understöchiometrischer Luftmenge mit  $\lambda \sim 0.3$ . Als Brennstoff gelangen naturbelassene Waldhackschnitzel mit einer Feuchte von 24% atro zum Einsatz.

Die Partikelgrößenverteilung im Festbettvergaser ist bimodal (Abbildung 5.5). Die Partikel im Größenbereich um 5  $\mu\text{m}$  werden nicht vergastem Holzkohlenkoks zugeordnet. Der Partikelmassenanteil im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  beträgt wie bei der Verbrennung rund 60 mg/Nm<sup>3</sup>. Allerdings enthalten die Staubpartikel aus dem Vergaser noch beträchtliche Kohlenstoffmengen.

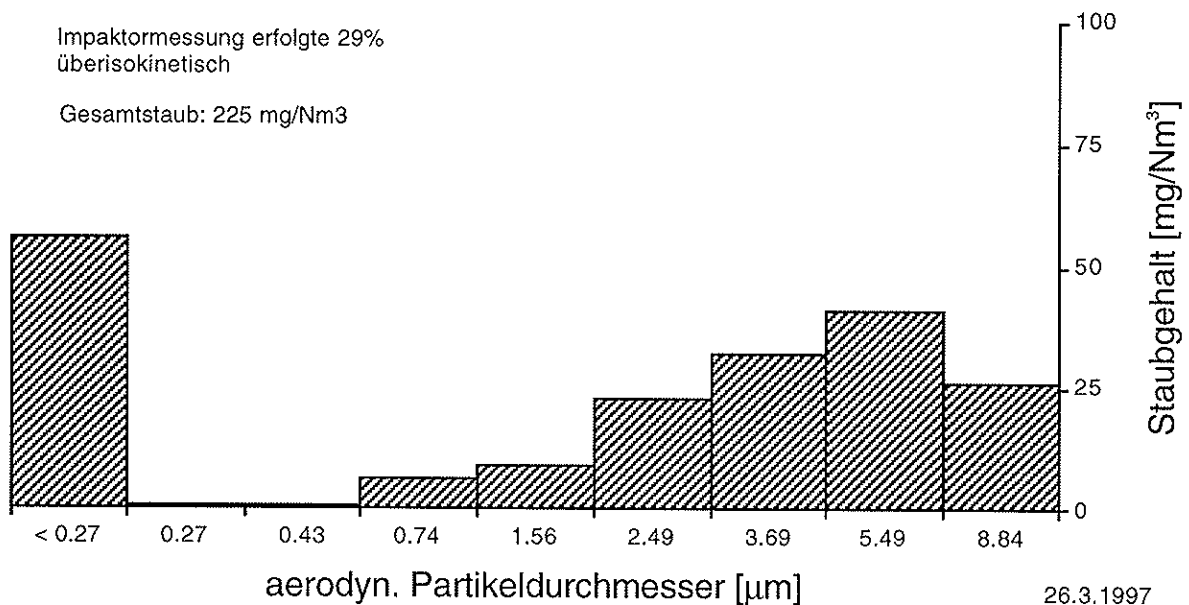


Abbildung 5.5: Partikelgrößenverteilung bei der Vergasung von naturbelassenem Holz im open top Gleichstromvergaser IISc/DASAG  
Bemerkungen: Als Brennstoff wurden naturbelassene Waldhackschnitzel mit einer Feuchte u von 24% (atro) verwendet.

## 5.4 Partikelgrößenverteilung bei der Holzvergasung in einem Wirbelschichtvergaser

In einem Labor-Wirbelschichtvergaser mit maximal 150 kW Leistung wurde im heissen Rohgas eine Impaktormessung durchgeführt. Das Rohgas weist an der Probenahmestelle eine Temperatur von 800°C auf. Der Impaktor wird auf eine Temperatur von 270°C beheizt. Die Vergasung erfolgt bei unterstöchiometrischer Luftmenge mit  $\lambda \sim 0.3$ . Als Brennstoff gelangen naturbelassene Waldhackschnitzel mit einer Feuchte von 3% atro zum Einsatz.

Die Partikel aus den Wirbelschichtvergaser sind wie beim Festbettvergaser bimodal verteilt (Abbildung 5.6). Der Anteil der grösseren Partikel ist jedoch um beinahe eine Größenordnung höher als beim Festbettvergaser. Der Partikelanteil im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  beträgt rund 150 mg/Nm<sup>3</sup>. Die Partikel im Grössenbereich um 20  $\mu\text{m}$  werden nicht vergastem Holzkohlenkoks zugeordnet.

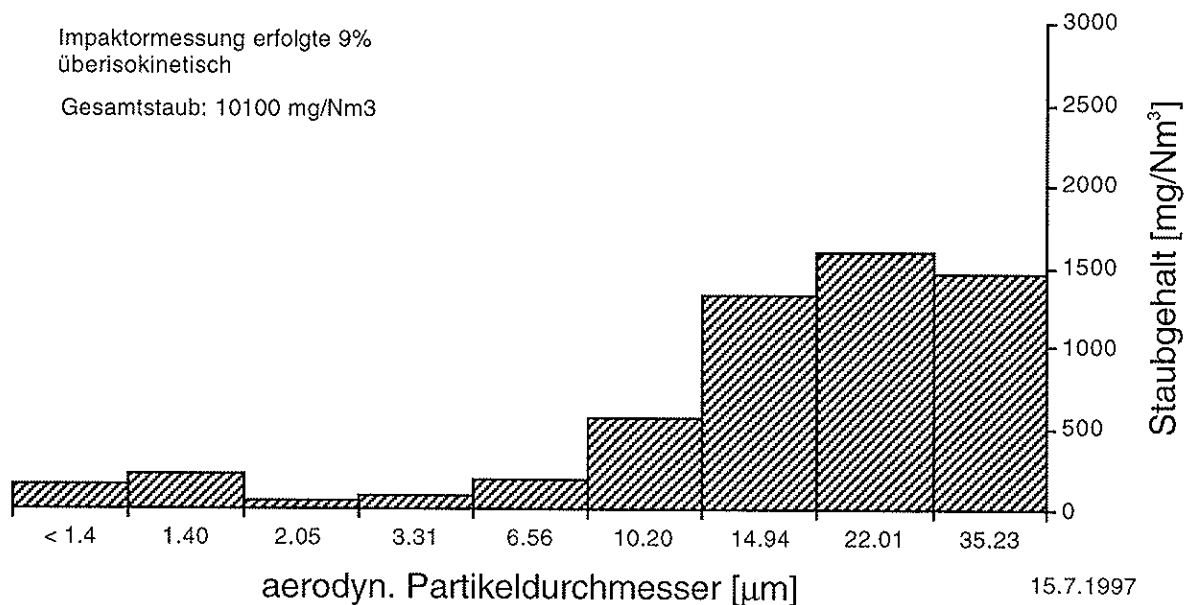


Abbildung 5.6: Partikelgrößenverteilung bei der Vergasung von naturbelassenem Holz im Laborwirbelschichtvergaser des Paul Scherrer Institutes PSI  
Bemerkungen: Als Brennstoff wurden naturbelassene Holzsnitzel mit einer Feuchte  $u$  von 3% (atro) verwendet; die Vergaserleistung beträgt rund 30 kW (Bezug auf Brennstoffmassenstrom); der Reaktor wird auf einer Temperatur von 800°C gehalten.



## 6 Schlussfolgerungen

Die Partikelgrössenverteilungen sind einerseits durch den Brennstoff und andererseits durch den Feuerungsbetrieb beeinflusst. Mit Ausnahme von Rinde liegen immer mindestens 80% der Partikelmasse im Grössenbereich  $< 1 \mu\text{m}$  vor. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Spanplatten oder Gras liegen die höchsten Partikeldichten im Grössenbereich von  $0.1 \mu\text{m}$ . Die Feuerungseinstellung, insbesondere die Abgasrückführung, hat bei der untersuchten Unterschubfeuerung einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtstaubgehalt im Abgas, nicht hingegen auf die relative Verteilungsdichtefunktion. Bei maximal möglicher Abgasrückführung wurde ein Gesamtstaubgehalt von rund  $30 \text{ mg/Nm}^3$  bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$  erreicht. Ohne Abgasrückführung beträgt der Gesamtstaubgehalt dagegen rund  $110 \text{ mg/Nm}^3$ .

In einer kürzlich abgeschlossenen Untersuchung über Partikelmessungen bei Holzfeuerungen wird behauptet, dass die submikronen Staubpartikel auf unverbrannte Bestandteile des Brennstoffes zurückzuführen sind [Hüglin 1997]. Unverbrannte Partikel sind kohlenstoffreich und haben eine schwarze Färbung. Die auf den Impaktorstufen abgeschiedenen Partikelfractionen haben jedoch eine weisse Farbe. Untersuchungen an derselben Vorschubrostfeuerung haben zudem gezeigt, dass der Restkohlenstoffgehalt des Gesamtstaubes aus der Verbrennung von Gras und Holz bei guten Ausbrandbedingungen unter 1 Gew.-% beträgt [Kaufmann 1997]. Die auf dem Impaktor abgeschiedenen Partikel sind daher mit grosser Wahrscheinlichkeit ebenfalls nahezu kohlenstofffrei und nicht auf unverbrannte Bestandteile des Brennstoffs zurückzuführen. Es wird vermutet, dass die Aerosolpartikel durch Kondensation von flüchtigen Aschebestandteilen entstehen und dass bei gleichen Verbrennungsbedingungen zwischen dem Gesamtstaubgehalt und dem Aschegehalt im Brennstoff ein annähernd linearer Zusammenhang besteht.

Der Kaskadenimpaktor ist ein relativ einfach handhabbares Messgerät, um die Grössenverteilung von Flugstaubpartikeln im Abgasstrom von Feuerungen bei hohen Temperaturen zu bestimmen. Im Bereich von  $0.2$  bis  $10 \mu\text{m}$  (aerodynamischer Durchmesser) werden zehn Grössenklassen ermittelt, wovon drei im Submikronbereich liegen. Zur Steigerung der Geräteauflösung  $< 1 \mu\text{m}$  wurden in den letzten Impaktordüsen teilweise deutlich höhere Gasgeschwindigkeiten gewählt als üblich ist. Trotzdem wurde kein Blow off Effekt beobachtet. Eine detailliertere Charakterisierung der submikronen Staubpartikel bei der Verbrennung erfordert ergänzende Analysen mit höherer Auflösung. Für eine allfällige chemische Untersuchung von Staubfractionen (Elementarzusammensetzung, organische Schadstoffe) ist der Impaktor jedoch unersetzlich. Im weiteren ist der Kaskadenimpaktor vermutlich das geeignetste Verfahren zur direkten Partikelgrössenbestimmung bei der Vergasung.

## **7 Anhang**

### **7.1 Reproduzierbarkeit von Impaktormessungen**

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Impaktormessungen dienen Messergebnisse aus Einzelversuchen. Die Versuchsbedingungen wie z.B. die Absaugeschwindigkeit oder die Feuerungseinstellung können in den Versuchen verschieden sein, so dass Abweichungen in den Grössenverteilungen nicht a priori auszuschliessen sind. Die Ausführungen in Kapitel 3.4 legen allerdings den Schluss nahe, dass die Absaugeschwindigkeit bzw. die Düsengeschwindigkeit für die untersuchten Staubarten keinen signifikanten Einfluss auf die Verteilung ausübt.

Die Dichtefunktionen in Abbildung 7.1 zeigen für vereinzelte Versuche Abweichungen. Mehrheitlich sind die Partikelgrössenverteilungen jedoch innerhalb der Messgenauigkeit annähernd deckungsgleich. Die beobachteten Abweichungen werden unterschiedlichen Betriebsbedingungen (z.B. Primärluftanteil, Brennstoffbelegung des Rostes etc.) zugeordnet.

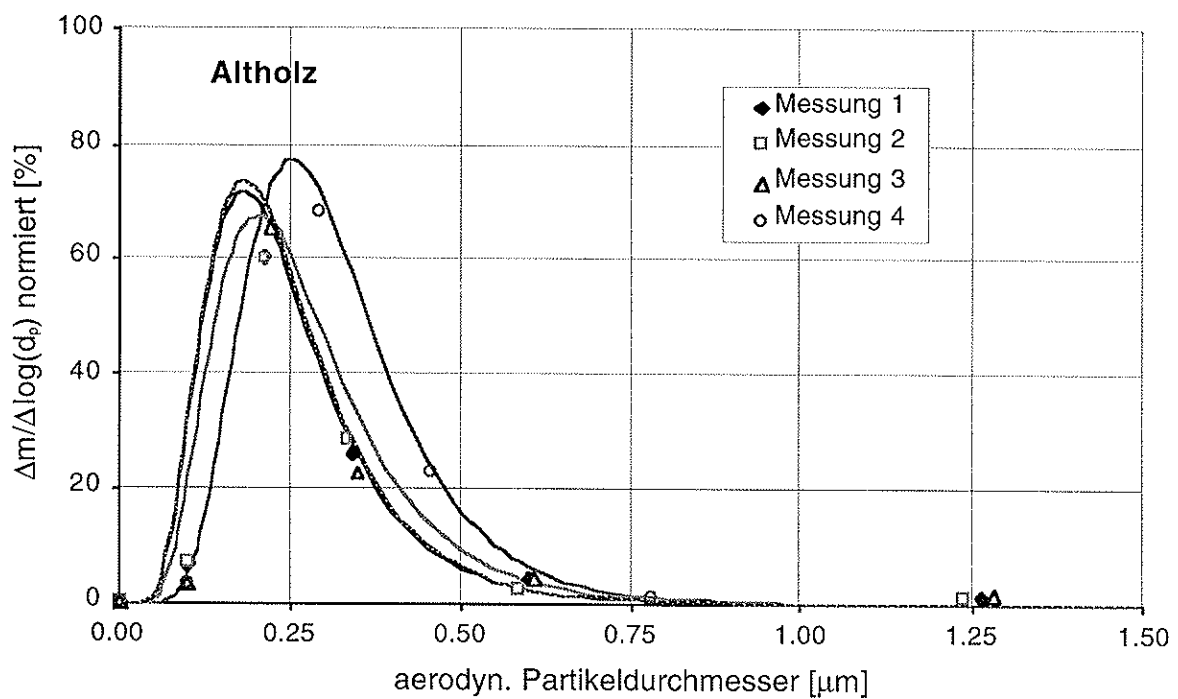
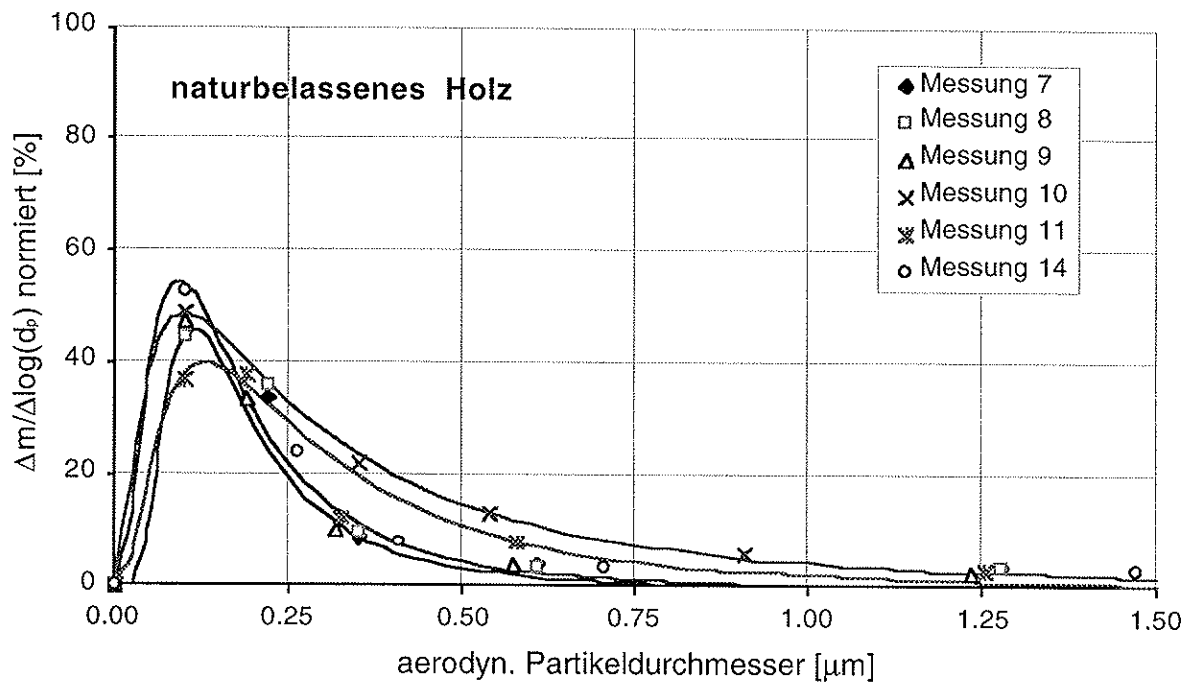


Abbildung 7.1: Partikelgrößenverteilungen (Dichtefunktion) bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz und Altholz in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung  
 Bemerkung: Approximation der Dichtefunktion mittels log-Normalverteilung .

## 7.2 Partikelgrößenverteilung vor und nach Zyklon

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung werden die Partikelgrößenverteilungen vor und nach einem Multizyklon ermittelt (Abbildung 7.2). Die Impaktormessungen erfolgen bei Anlagenvollastbetrieb und bei vergleichbaren Betriebsbedingungen. Der Impaktor ist aussenliegend angeordnet.

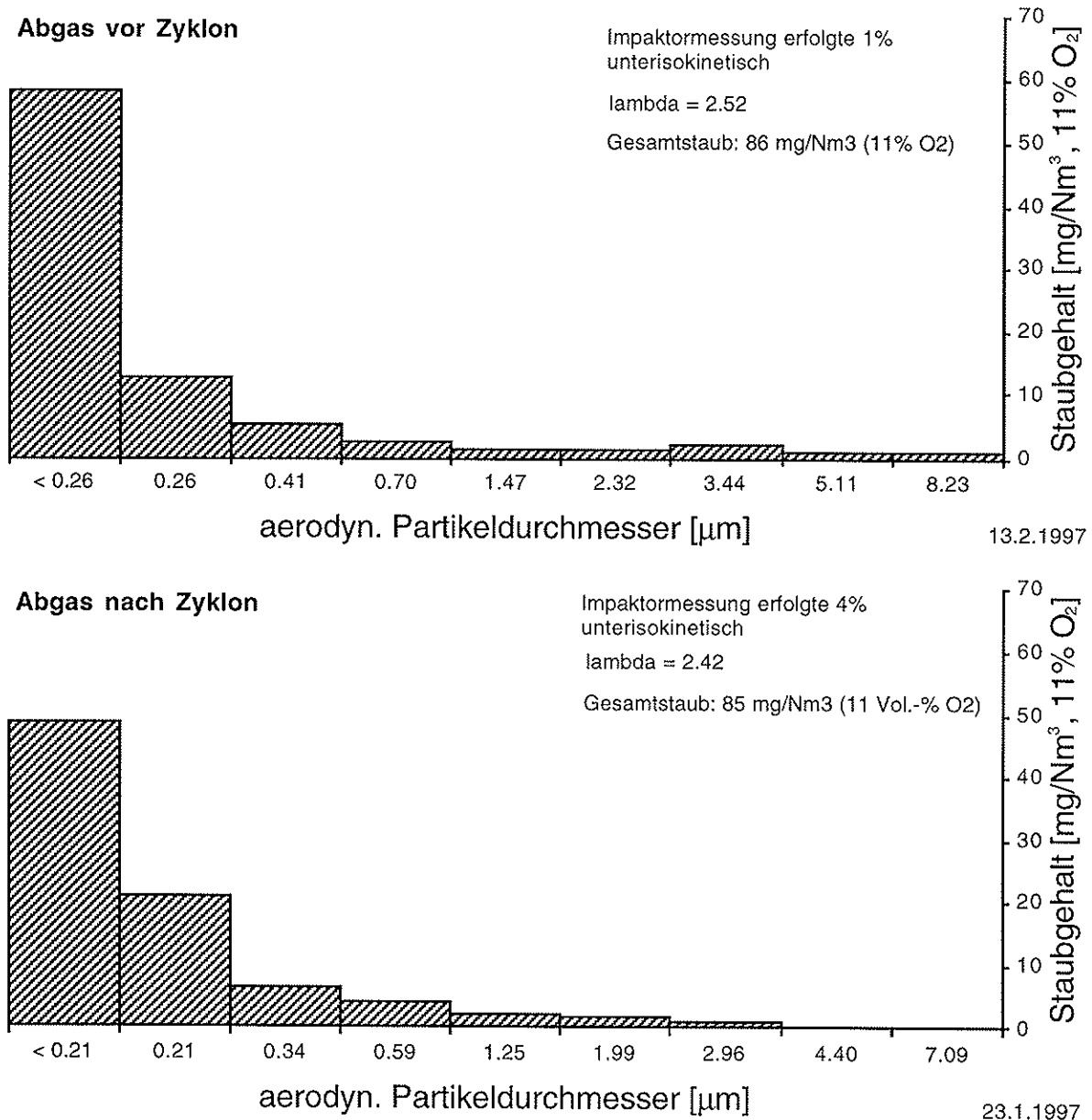


Abbildung 7.2: Partikelgrößenverteilungen im Abgas vor und nach einem Multizyklon bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in einer Vorschubrostfeuerung

Mit Ausnahme der Partikel im Größenbereich  $> 3 \mu\text{m}$  unterscheiden sich die Verteilungen vor und nach dem Zyklon nicht wesentlich, im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  sind sie nahezu identisch (Abbildung 7.3).

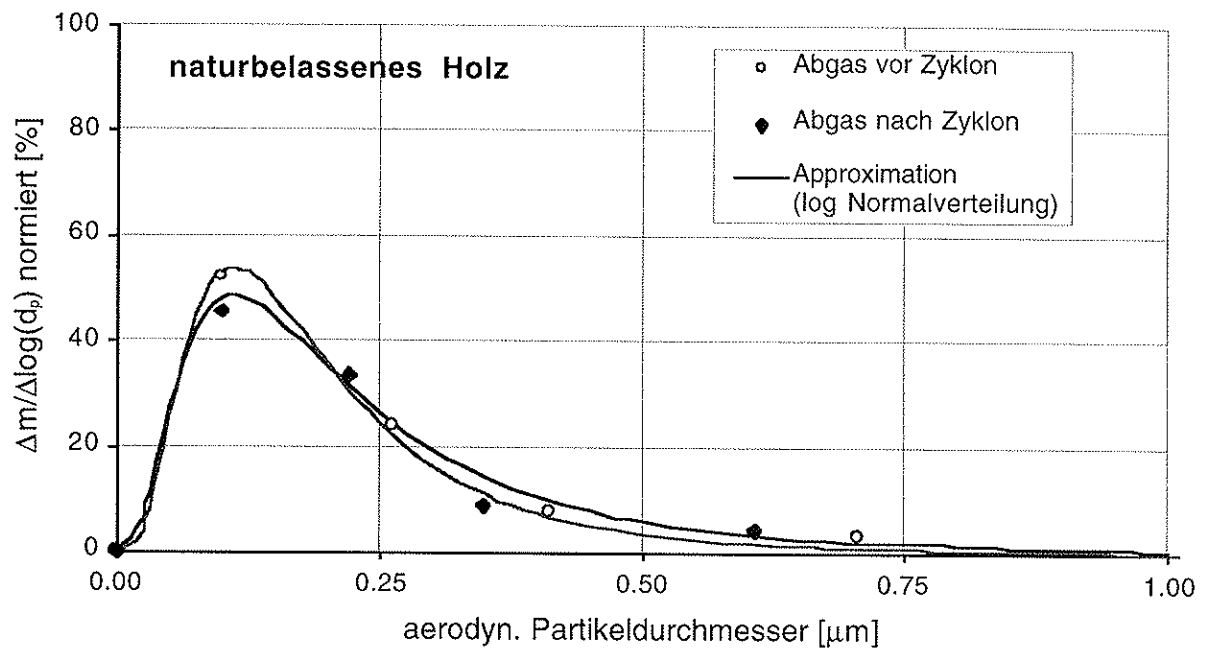


Abbildung 7.3: Verteilungsdichtefunktion der Partikel vor und nach einem Multizyklon bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in einer Vorschubrostfeuerung  
 Bemerkungen: Approximation der Dichtefunktion mittels log-Normalverteilung ( $x_{\text{mean}} = 0.11 \mu\text{m}$ ;  $s_{\text{dev}} = 0.28$  bzw.  $0.32 \mu\text{m}$ ).

Die Gesamtstaubgehalte im Roh- und im Reingas sind nahezu identisch, da der Zyklon für Partikel  $< 2 \mu\text{m}$  einen vernachlässigbar geringen Abscheidegrad aufweist.

## 7.3 Vergleich innen- und aussenliegender Impaktor

Aus zwei Impaktormessungen im Abgas nach einem Multizyklon wurde die Partikelgrößenverteilung bei innen- und aussenliegender Positionierung des Impaktors ermittelt. Die Messungen erfolgten bei gleichen Betriebsbedingungen kurz aufeinander. Üblicherweise wird die aussenliegende Messung bevorzugt, da sie weniger aufwendig ist. Bei der innenliegenden Messung werden zudem die Impaktionsplatten von unten nach oben angeströmt, während bei aussenliegender Messung das Gas von oben eindringt. Bei schlecht haftenden Partikeln besteht bei der innenliegenden Messung die Gefahr eines Verlustes von Partikeln durch Herabfallen.

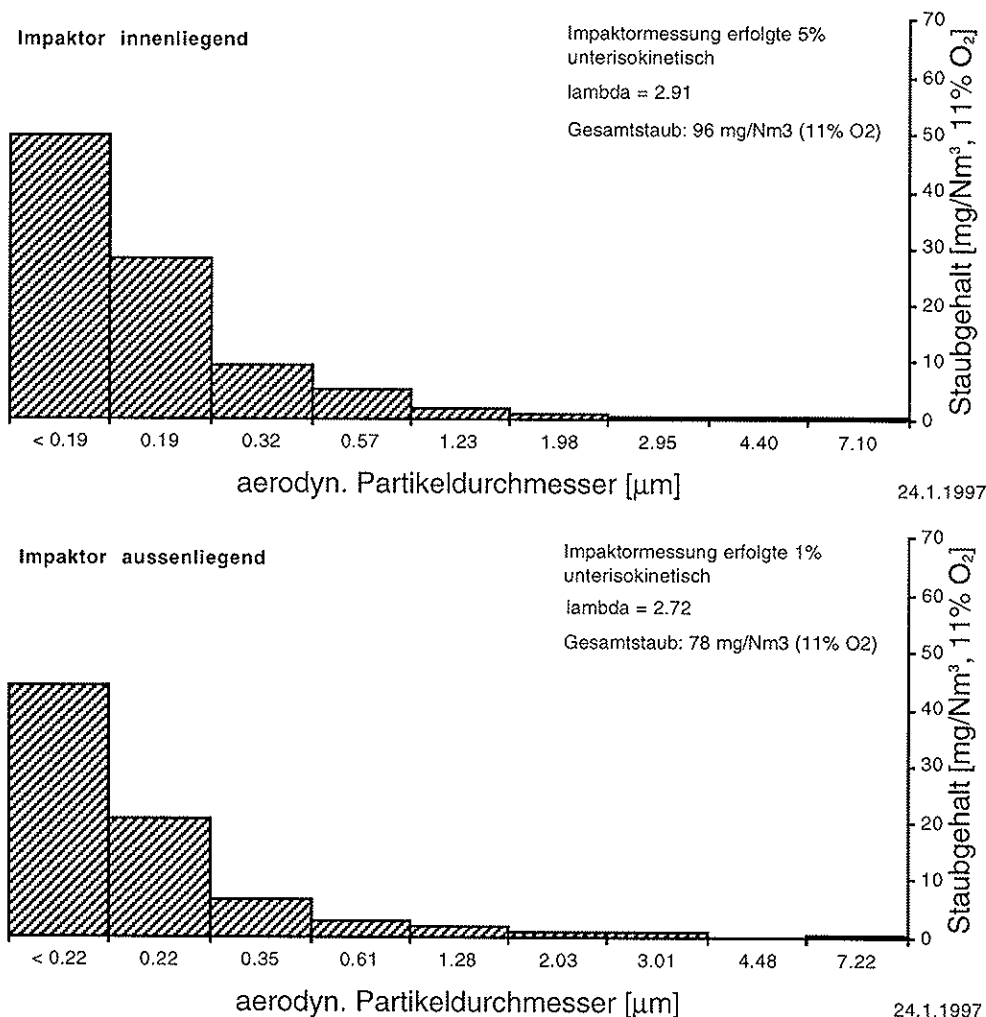


Abbildung 7.4: Partikelgrößenverteilung im Abgas einer 450 kW Holz-Vorschubrostfeuerung bei innen- (Messung 9; oberes Bild) und aussenliegender (Messung 8; unteres Bild) Anordnung des Kaskadenimpaktors  
 Bemerkungen: Als Brennstoff wurden naturbelassene Waldhackschnitzel verwendet; Der Wägemessfehler beeinflusst die Staubgehalte im Bereich von ca.  $\pm 0.5$  mg/Nm<sup>3</sup>.

Die gefundenen Partikelgrössenverteilungen bzw. die Partikeldichtefunktionen (Abbildung 7.5) sind praktisch deckungsgleich. Bei der innenliegenden Messung wurde insgesamt ein etwas grösserer Gesamtstaubgehalt ermittelt. Die Abweichung kann jedoch auch feuerungstechnisch bedingt sein, da bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz Gesamtstaubgehalte zwischen 78 bis 123 mg/Nm<sup>3</sup> beobachtet wurden.

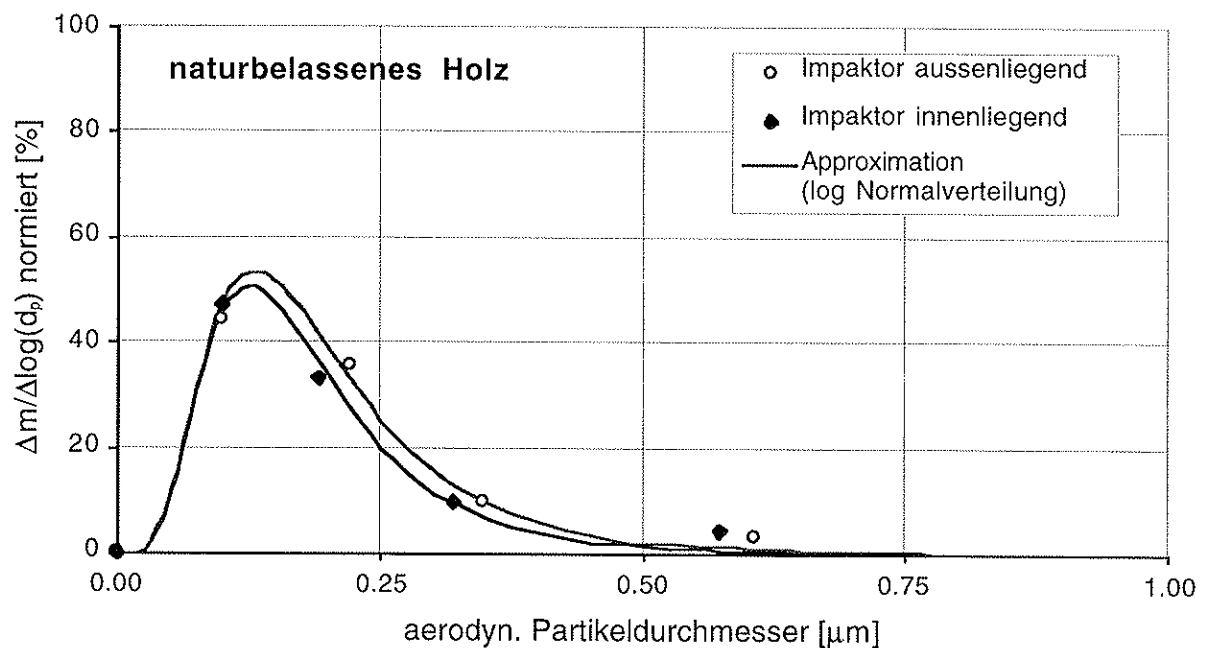


Abbildung 7.5: Partikeldichtefunktionen bei aussen- und innenliegender Anordnung des Kaskadenimpaktors  
 Bemerkungen: Approximation der Dichtefunktion durch eine log-Normalverteilung mit den Parametern  $x_{\text{mean}} = 0.12$  bzw.  $0.13 \mu\text{m}$  und  $\text{sdev} = 0.22$  bzw.  $0.23 \mu\text{m}$ .

## 7.4 Vergleich von Impaktormessung mit einer Offline Partikelgrössenanalyse

In der Literatur finden sich mitunter Angaben zu Partikelgrössenverteilungen, bei denen der Flugstaub mit Hilfe eines Offline Verfahrens untersucht wird. Dabei wird z.B. Staub auf einem Planfilter gesammelt und anschliessend im Labor charakterisiert. Für diese Untersuchung war zum Vergleich eine parallele Messung mit dem Impaktor und einem Planfilter vorgesehen. Die parallele Beprobung war jedoch nicht möglich, da das Planfilter nach kurzer Zeit verstopfte und nur wenige mg Staub gesammelt werden konnten. Die Offline Analysen wurden daher mit Aschen durchgeführt, die bei Versuchen mit Gras und Altholz in einem Gewebefilter-Versuchsstand anfielen. Diese Versuche erfolgten auf derselben Vorschubrostfeuerung wie die hier berichteten Impaktormessungen. Zusätzlich wurde eine Elektrofilterasche aus einer gewerblichen Vorschubrostfeuerung für Altholz (1800 kW) untersucht. Die Partikelgrössenanalyse erfolgt mittels eines optischen Messverfahrens von in Flüssigkeit dispergierten Flugaschepartikeln.

Mit Ausnahme der Gewebefilterasche aus der Grasverbrennung beträgt der Massenanteil der Partikel  $< 0.5 \mu\text{m}$  mehr als 60% (Abbildung 7.6). Die Ergebnisse stimmen somit qualitativ mit denjenigen aus den Impaktorversuchen überein. Eine quantitative Partikelgrössenanalyse von Flugaschepartikeln aus der Biomasseverbrennung ist jedoch über den Weg einer Offline Methode nicht möglich, da das Messverfahren nur Partikel bis zu  $0.5 \mu\text{m}$  auflösen kann (Laborbericht LPM). Dabei ist zudem zu berücksichtigen, dass die Partikelsammlung (Gewebefilter: Aufbau eines möglichst kompakten Filterkuchens; pneumatische Abreinigung) und die Lagerung (Partikel aus der Grasverbrennung bestehen hauptsächlich aus hygroskopischen Salzen) zu einer Kompaktierung und Veränderung der Partikelmorphologie führen kann.

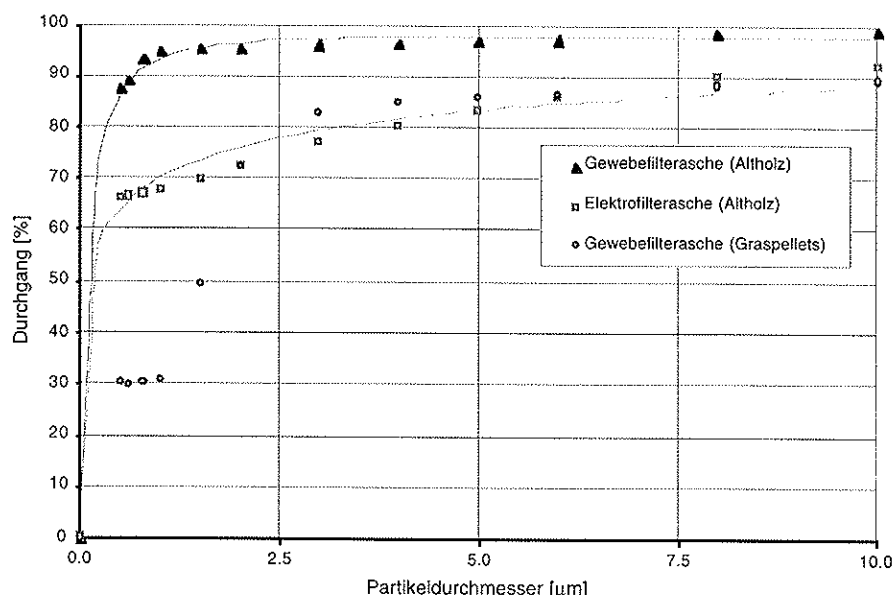


Abbildung 7.6: Summenverteilungsfunktion von Flugaschepartikeln aus der Verbrennung von Altholz und Gras in Vorschubrostfeuerungen  
Bemerkungen: Die Summenfunktion wurde mittels einer Lichtbeugungsmethode von dispergierten Gewebefilter- oder Elektrofilterascheproben ermittelt (siehe Laborbericht LPM).





LPM AG  
Labor für Prüfung und  
Materialtechnologie

# Flugasche

Im Auftrag von:

Verenum

Ingenieurbüro für Verfahrens- Energie- &

Umwelttechnik

8006 Zürich

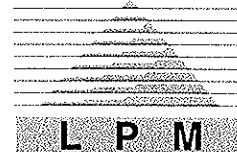
## Inhalt

Prüfbericht	-
Expertise	1
Anhang	-

Auftrag: 18'168-1 / 28.04.97

Dr. Michael von der Crone

Untersuchungsbericht

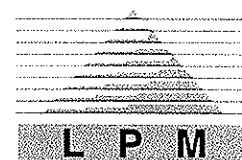


**LPM AG**  
**Labor für Prüfung und**  
**Materialtechnologie**  
Tanneweg 10  
5712 Beinwil am See  
Telefon 062 771 55 55  
Telefax 062 771 55 64

Auftragsnummer	A - 18'168-1
Auftraggeber	Verenum Ingenieurbüro für Verfahrens- Energie- & Umwelttechnik Herr Dr. Ph. Hasler Langmauerstrasse 109 8006 Zürich
Auftragerteiler	Verenum Ingenieurbüro für Verfahrens- Energie- & Umwelttechnik Herr Dr. Ph. Hasler Langmauerstrasse 109 8006 Zürich
Rechnung wurde gesandt an	Verenum Ingenieurbüro für Verfahrens- Energie- & Umwelttechnik Herr Dr. Ph. Hasler Langmauerstrasse 109 8006 Zürich
Objekt	Flugasche
Untersuchungs- gegenstand	Partikelgrössenanalyse
Baustoff	Flugasche
Bestelldatum	28. Januar 1997
Probeneingang	30. Januar 1997
Auslieferdatum	28. April 1997
Fakturadatum	28. April 1997
Gutachter	Dr. Michael von der Crone

Expertise                    A - 18'168-1  
Im Auftrag von            Verenum  
Objekt                      Flugasche

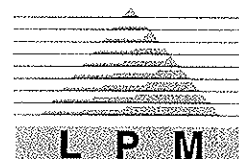
---



## Expertise

1. Auftragsbeschreibung
2. Prüfungen
3. Probenmaterial
4. Prüfergebnisse

Expertise A - 18'168-1  
 Im Auftrag von Verenum  
 Objekt Flugasche



## 1. Auftragsbeschreibung

Bezugnehmend auf eine telefonische Besprechung von 28. Januar 1997 zwischen Herrn Nussbaumer, Verenum, und Herrn von der Crone, LPM AG, wurden der LPM AG Flugascheproben zur Partikelgrössenanalyse zugestellt.

## 2. Prüfungen

Folgende Prüfungen kamen zur Anwendung:

Partikelgrössenanalyse mittels Sedigraph

Zur Durchführung werden die Proben entsprechend DIN 18123 vorbereitet und in der Messflüssigkeit dispergiert. Zum Messen wird die Probe in eine Messzelle gepumpt. Ein Röntgenstrahl tastet die Messzelle ab, die Intensität der durchgehenden Strahlung wird als Funktion der Fallhöhe und der Zeit erfasst. Durch Vergleich der „Basislinie“, d.h. der Intensität des Strahls durch die nur mit der Messflüssigkeit gefüllte Zelle und der „100-Prozent-Linie“, d.h. mit 100 % Partikel im Strahlengang, wird über das Stokes'sche Gesetz die Korngrössenverteilung berechnet. Es ist keine Eichung oder Kalibrierung notwendig.

## 3. Probenmaterial

- Probe 1: Elektrofilterasche aus der Verbrennung von Altholz
- Probe 2: Gewebefilterasche aus der Verbrennung von Altholz
- Probe 3: Gewebefilterasche aus der Verbrennung von Graspellets

## 4. Prüfergebnisse

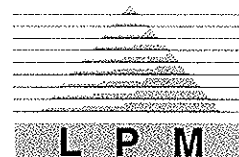
Hinweis : Alle Resultate beziehen sich ausschliesslich auf die aufgeführten Prüfkörper.

ø µm	D (%)	D/I (%)	D (%)	D/I (%)	D (%)	D/I (%)	D (%)	D/I (%)	D (%)	D/I (%)
	Elektrofilterasche		Gewebefilterasche C-319				Gewebefilterasche AB 32			
100.0	99.6	0.4	100.0	-0.1	98.8	1.2	95.4	4.6	92.2	7.1
80.0	99.7	-0.1	99.8	0.4	98.9	-0.1	94.4	1.0	93.7	-0.8
60.0	99.4	0.3	99.3	0.5	99.1	-0.2	93.8	0.6	93.5	0.2
50.0	99.4	0.1	99.1	0.1	99.1	0.0	93.8	0.1	93.2	0.3
40.0	99.6	-0.2	99.3	-0.2	98.8	0.2	93.7	0.1	92.9	0.3
30.0	99.3	0.3	99.3	0.0	99.1	-0.3	93.0	0.7	92.4	0.5
25.0	98.8	0.5	99.1	0.1	98.7	0.4	92.3	0.7	91.8	0.6
20.0	98.1	0.7	99.2	-0.1	97.7	1.0	91.6	0.6	91.1	0.8
15.0	96.4	1.7	99.2	0.0	97.4	0.3	91.0	0.7	90.3	0.7
10.0	92.5	3.8	99.1	0.1	98.0	-0.5	89.4	1.6	88.9	1.4

Expertise A - 18'168-1

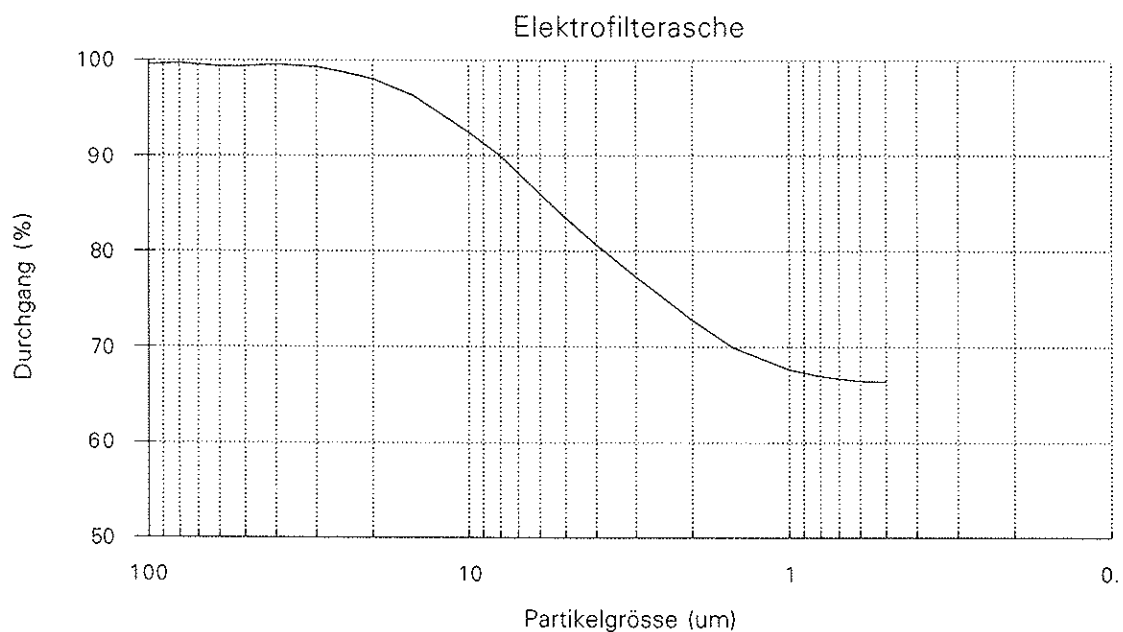
Im Auftrag von Verenum

Objekt Flugasche

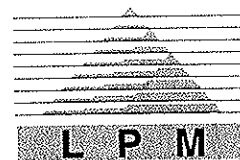


ø µm	D (%) Elektrofilterasche	D/I (%)	D (%) Gewebefilterasche C-319	D/I (%)	D (%) Gewebefilterasche C-319	D/I (%)	D (%) Gewebefilterasche AB 32	D/I (%)	D (%) Gewebefilterasche AB 32	D/I (%)
8.0	90.0	2.5	98.5	0.6	97.3	0.6	88.3	1.0	88.2	0.7
6.0	86.0	4.0	97.4	1.0	96.1	1.2	86.9	1.4	86.7	1.5
5.0	83.5	2.5	97.0	0.4	95.6	0.6	86.2	0.7	85.9	0.8
4.0	80.7	2.8	96.6	0.4	95.2	0.4	85.2	1.0	85.2	0.7
3.0	77.2	3.4	96.3	0.3	94.6	0.6	83.0	2.2	83.3	1.8
2.0	72.7	4.5	95.8	0.5	94.0	0.6	72.9	10.1	67.2	16.2
1.5	69.9	2.8	95.3	0.5	93.5	0.5	49.5	23.4	41.6	25.6
1.0	67.7	2.3	95.2	0.1	92.6	0.9	31.1	18.4	30.6	11.0
0.8	67.0	0.7	93.6	1.6	91.3	1.3	30.3	0.8	29.6	1.0
0.6	66.5	0.5	89.3	4.3	89.4	1.9	30.0	0.3	29.4	0.2
0.5	66.4	0.2	87.8	1.5	88.7	0.8	30.3	-0.3	29.3	0.1

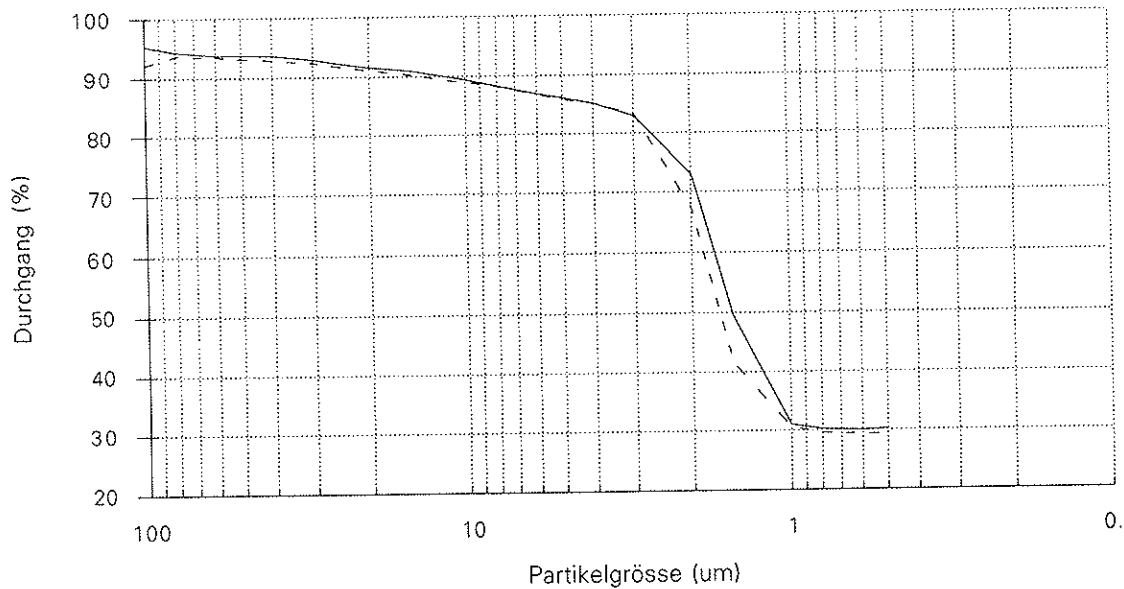
D (%) = Durchgang in Prozent  
D/I (%) = Durchgang in Prozent pro Intervall



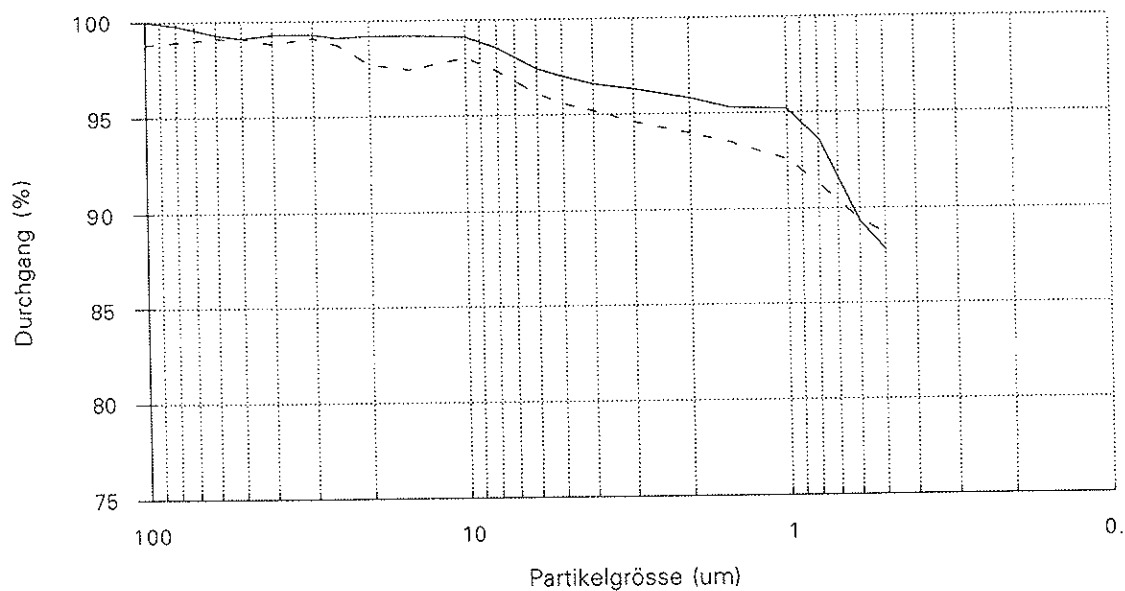
Expertise A - 18'168-1  
Im Auftrag von Verenum  
Objekt Flugasche



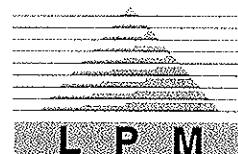
Gewebefilterasche AB 32



Gewebefilterasche C-319

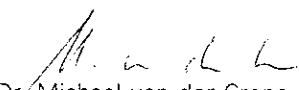


Expertise A - 18'168-1  
Im Auftrag von Verenum  
Objekt Flugasche



Beinwil am See, 28.4.1997/Cr

LPM AG Labor für Prüfung und Materialtechnologie  
Abt. Erhaltung von Bauwerken

  
Dr. Michael von der Crone



Hinweis: Dieser Bericht darf ohne schriftliche Genehmigung der Direktion der LPM AG nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

## 8 Literatur

- Baumbach, G.:* Luftreinhaltung, Springer Verlag, Berlin, 1993
- Brouwers, J.J.H.:* Secondary flows and particulate centrifugation in slightly tilted rotating pipes, Appl. Sci. Res. 55, 95-105, 1995
- Brouwers, J.J.H.:* Rotational particulate separator: A new method for separating fine particulates and mists from gases, Chem. Eng. & Technol. 19, 1-10, 1996a
- Brouwers, J.J.H.:* Persönliche Mitteilung, 1996b
- Cushing, K.M.; Lacey, G.E.; McCain, J.D.; Smith, W.B.:* Particulate sizing techniques for control device evaluation: cascade impactor calibrations. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington D.C., EPA report 600/2-76-280, Oktober 1976
- Dasch, J.M.:* Particulate and gaseous emissions from wood burning fireplaces, Environ. Sci. Technol. 16 (1982), Nr. 10, 639-645
- De Sousa, L.; Hütter, P.; Mayor, J.; Quintilli, M.:* Fluidized bed reactor for the Gasification of Biomass, PSI General Energy Technology Newsletter 1994, Annex V - Annual Report 1994, Paul Scherrer Institut, Würenlingen und Villigen, 1994
- Fissan, H.; Helsper, C.; Muggli, J.; Scheidweiler, A.:* Particle Number Distribution of Aerosols from Test Fires, J. Aerosol. Sci 11 (1980), 439-446
- Franzen, H.; Fissan, H.J.:* Das Abscheideverhalten von Andersen non-viable und Andersen Stack Sampler bei Verwendung von Glasfaserplatten, Staub – Reinhaltung der Luft, Vol. 39, Nr.2 (1979), 50-55
- Fritz, H.; Kern, W.:* Reinigung von Abgasen, Umweltschutz Entsorgungstechnik, Vogel Buchverlag, Würzburg (Germany), 1990
- Harris, D.B.:* Procedures for cascade impactor calibration and operation in process streams, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-004, Washington DC, January 1977
- Hügli, C.:* New applications of aerosol Fotoemission: Characterisation of wood combustion particles and time resolved thermal desorption studies. Diss. ETH Nr. 11975, ETH Zürich, 1997
- Giordano, P.; Salzmann, R.; Sharan, H.:* Adaptation du gazéificateur IISc/Dasag pour une application en Suisse, Schlussbericht Phase I (Projekt Nr. 53 313), Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), 3003 Bern, August 1996
- Kaufmann, H.P.:* Chlorine-Compounds in Emissions and Residues from the Combustion of Herbaceous Biomass, Dissertation Nr. 12429, ETH Zürich, 1997



- Kleinn, J.:* Partikelgrössenanalyse im Abgas von Holzfeuerungen, Semesterarbeit im Wintersemester 1996/97 im Rahmen der Vorlesung Energietechnik und Umwelt von Dr. Th. Nussbaumer, ETH Zürich, Abteilung Umweltnaturwissenschaften, Februar 1997
- Markowski, G.R.:* On identifying and correcting for reentrainment in cascade impactor measurements, *Aerosol Sci. Technol.* 7 (1987), 143-159
- Markowski, G.R.:* Reducing blowoff in cascade impactor measurements, *Aerosol Sci. and Technology* 3 (1984), 431-439
- Newton, G.J.; Carpenter, R.L.; Cheng, Y.S.; Barr, E.B.; Yeh, H.C.:* High-Temperature-High-Pressure cascade impactor design, performance and data analysis methods, *J. Colloid. Interface Sci.* 87, no. 1 (may 1982), 279-290
- Nussbaumer, Th. 1989:* Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Dissertation Nr. 8838, ETH Zürich, 1989
- Obernberger, I.; Biedermann, F.:* Anlagenkonzept zur fraktionierten Ascheabscheidung bei Holzfeuerungen, in: *Feuerungstechnik, Ascheverwertung und Wärme-Kraft-Kopplung*, Tagungsband zum 4. Holzenergie-Symposium (Hrsg. Th. Nussbaumer), ETH Zürich, Oktober 1996
- Smith, W.B.; Cushing, K.M.; Lacey, G.E.; McCain, J.D.:* Particulate sizing techniques for control devices, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-74-102a, Washington DC, August 1975
- Willeke, K.; Baron, P.A.:* *Aerosol Measurement – Principles, Techniques and Applications*, Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1993