

Bericht

„Grundsatzuntersuchung über die Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten ($< PM_{2,5}$ und $< PM_{10}$)“

**Projekt I:
Anlagen der Zement-, Glas-, Keramik- und Metallindustrie, Asphaltmischanlagen,
Schwerölfeuerungsanlagen**

Dezember 2000

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

Auftragnehmer TÜV Ecoplan Umwelt GmbH
Unternehmensgruppe TÜV Süddeutschland
Westendstr. 199
80686 München

Projektgruppe: Konrad Mair, Angelika Stöttner (LfU)
Dr. Alfred Brandl, Heinrich Samhammer, Andreas Pressler, Josef Strobl
(TÜV Ecoplan Umwelt GmbH)

1	Einleitung und Aufgabenstellung	3
2	Messung von Staub und der Korngrößenverteilung	4
2.1	Gesamtstaub	4
2.2	Messen der Korngrößenverteilung	6
3	Zusammenfassung	13
3.1	Übersicht über die untersuchten Anlagen	13
3.2	Messergebnisse	14

1 Einleitung und Aufgabenstellung

„Kranke Lungen trotz sauberer Luft ?“ Diese oder ähnliche Schlagzeilen sind seit einiger Zeit in der Presse zu lesen. Anlass hierzu geben verschiedene wissenschaftliche Studien, die zeigen, dass Feinstäube in der Luft ein Gesundheitsrisiko für den Menschen darstellen.

Zum Schutz der Gesundheit und der Umwelt verabschiedete der Rat der Europäischen Union die Richtlinie 1999/30/EG vom 24.04.99. Diese Richtlinie setzt u.a. Immissionsgrenzwerte für Partikel-PM10 in der Luft fest. Unter diesen Partikel versteht man diejenigen, die einen gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 μm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.

Die Auswertung der bisher vorliegenden Immissionsmessergebnisse lässt erwarten, dass die in der Richtlinie des Rates vorgegebenen Immissionsgrenzwerte derzeit noch häufig überschritten sind. Um den Beitrag von Industrieanlagen sicherer abschätzen zu können, führte das Landesamt für Umweltschutz zusammen mit der TÜV Ecoplan Umwelt GmbH Untersuchungen der Feinstaubemissionen im Bereich der industriellen Anlagen durch.

Im Zeitraum vom September 1998 bis August 1999 wurden hierzu an verschiedenen bayerischen Anlagen mittels Kaskadenimpaktoren die Emissionen an Gesamtstaub und deren Partikelgrößenverteilung im Abgas bestimmt.

Es sollte folgende Korngrößenverteilung ermittelt werden:

- I. $d_{ae50} > 10 \mu\text{m}$
- II. $2,5 \mu\text{m} \leq d_{ae50} \leq 10 \mu\text{m}$
- III. $d_{ae50} < 2,5 \mu\text{m}$

Die zusätzlichen Messungen zur Bestimmung verschiedener anderer Abgasinhaltsstoffe und der Randparameter wurden entsprechend der Anlagenart festgelegt.

Folgende Branchen bzw. Anlagenarten wurden einbezogen: Zementindustrie, Feinkeramik, Glasindustrie, Aluminiumschmelzanlagen, Eisengießereien, Asphaltmischanlagen, Schweröl-Feuerungen und Anlagen zur Herstellung von Silizium.

2 Messung von Staub und der Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung von emittiertem Staub muss stets im Zusammenhang mit der Gesamtstaubkonzentration gesehen werden. Daher ist es bei jeder Messung der Korngrößenverteilung erforderlich, auch die Gesamtstaubkonzentration zu ermitteln. Da verschiedene Grundlagen der Messung von Gesamtstaub auch für die Bestimmung der Korngrößenverteilung gelten, werden nachfolgend sowohl die Grundprinzipien der Messung von Gesamtstaub als auch der Korngrößenverteilung näher beschrieben.

Die Grundlagen zur Staubbmessung werden in der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [1] dargestellt. Die manuelle Staubbmessung wird in den VDI-Richtlinien Blatt 2, 3 und 7 beschrieben [2,3,4]. Die fraktionierende Messung von Staub nach der Korngrößenverteilung mit dem Anderson-Impaktor erfolgt gemäß Richtlinie VDI 2066 Blatt 5 [5].

2.1 Gesamtstaub

Grundlegende Voraussetzung der Staubbmessung ist die isokinetische Probenahme im Rahmen einer Netzmessung. Der staubhaltige Abgasstrom wird an repräsentativen Punkten abgesaugt; der Staub wird auf einem in der Absaugsonde integrierten Filter abgeschieden. Die Bestimmung der gesammelten Staubmasse erfolgt gravimetrisch durch Auswiegen der Filter vor und nach der Probenahme im Labor. Die Filter werden vor der Wägung konditioniert, z. B. durch Trocknung bei 110 °C oder durch Äquilibrieren im klimatisierten Wägeraum.

Der grundlegende Aufbau der Staubbmesseinrichtung nach VDI 2066 ist nachfolgend dargestellt (Abb.1)

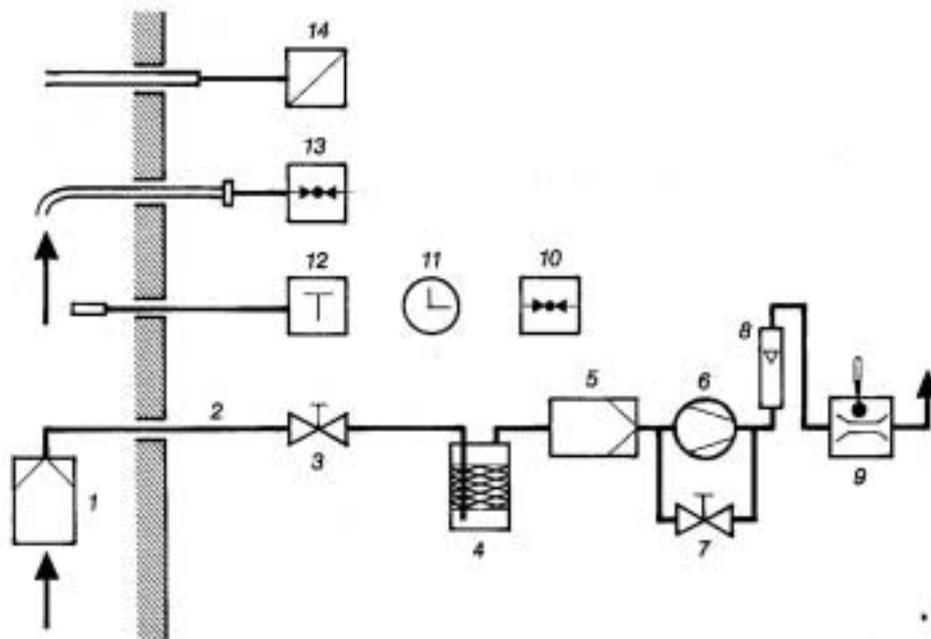


Abb. 1 Aufbauschema einer Probenahmeeinrichtung nach VDI 2066 (Prinzipschema)

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Filterkopf mit Sonde und Diffusor | 8 Schwabekörperdurchflussmesser |
| 2 Absaugerohr | 9 Gasmengenzähler mit Thermometer |
| 3 Absperrventil | 10 Barometer |
| 4 ggf. Trockenturm | 11 Zeitmesser |
| 5 Schutzfilter für Absaugeaggregat | 12 Temperaturfühler mit Anzeigeinstrument |
| 6 Absaugeaggregat (gasdicht) | 13 Prandtl-Staurohr mit Mikromanometer oder Anemometer |
| 7 Regelbypass | 14 ggf. Gasmessgerät |

Für Staubbelastungen im Bereich von 1 mg/m^3 bis $>100 \text{ mg/m}^3$ ist das Filterkopfgerät, das in der Richtlinie VDI 2066 Blatt 2 beschrieben ist, einsetzbar. Dieses Gerät verwendet zur Filterung mit Quarzwolle gestopfte Filterhülsen. Bei diesem Gerät liegt die Nachweisgrenze zwischen 1 und 3 mg/m^3 und es werden Standardabweichungen von $0,4 \text{ mg/m}^3$ in der Staubgehaltsklasse 1 bis 10 mg/m^3 und von $2,2 \text{ mg/m}^3$ in der Staubgehaltsklasse von 100 bis 300 mg/m^3 erreicht.

Bei Konzentrationen $< 20 \text{ mg/m}^3$ sollte aber vorzugsweise nach Blatt 7 gearbeitet werden. Die in dieser Richtlinie beschriebenen Planfilterkopfgeräte wurden vom TÜV Rheinland und vom TÜV Bayern für Staubgehalte im Konzentrationsbereich von $0,1$ bis 20 mg/m^3 entwickelt. Hier werden zur Staubabscheidung Quarzfaserplanfilter eingesetzt. Diese Geräte haben Nachweisgrenzen von $0,1$ bis $0,3 \text{ mg/m}^3$ und es sind Standardabweichungen von $0,04 \text{ mg/m}^3$ in der Staubgehaltsklasse 0 bis $0,5 \text{ mg/m}^3$ und von $0,33 \text{ mg/m}^3$ in der Staubgehaltsklasse von 0 bis 10 mg/m^3 erreichbar. Nachfolgend ist ein Planfilterkopf (Abb.2) dargestellt wie er im allgemeinen bei den vorliegenden Versuchen für die Gesamtstaubmessung eingesetzt wurde. Prinzipiell können auch Hülsenfilter mit Planfiltern kombiniert werden.

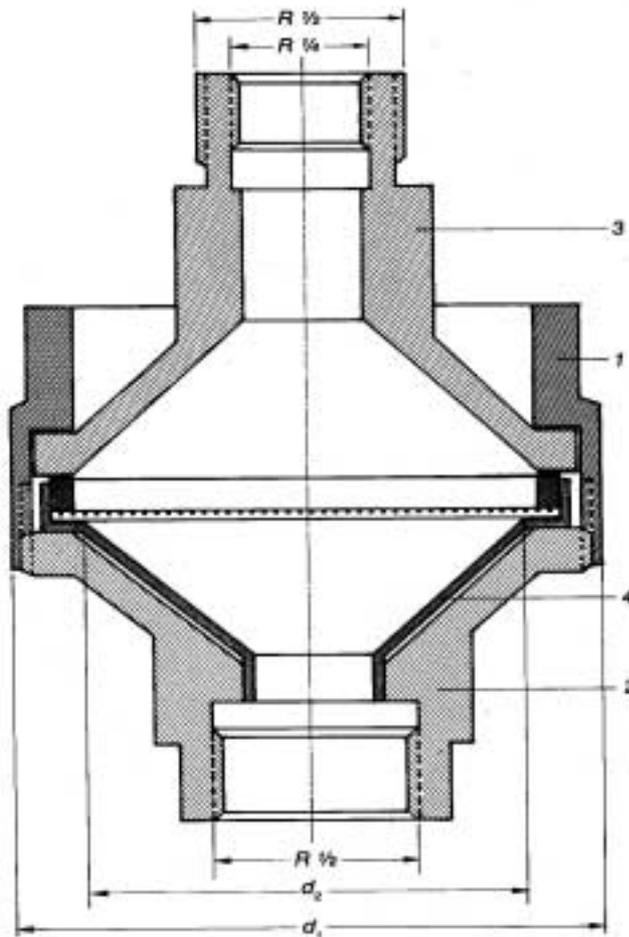


Abb. 2. Planfilterkopf (Ausführungsbeispiel 2) nach VDI 2066, Blatt 7 [4]

- 1 Überwurfmutter
- 2 Einlaufteil
- 3 Auslaufteil
- 4 Filterhalter mit Messfilter

- d_1 Gehäusedurchmesser (65 mm)
- d_2 wirksamer Filterdurchmesser (43 mm)
- Leermasse mit Filterhalter 25 g
- Aufnahmevermögen an Staub: max. 100 mg

Die folgende Tabelle zeigt die für den eingesetzten Planfilterkopf typischen Verfahrenskenngrößen:

Tab. 1 Verfahrenskenngrößen für gravimetrische Staubbestimmung nach VDI 2066, Bl. 7 (Planfilter) [4]

Anlagentyp	Staubgehaltsbereich mg/m ³	Anzahl der Messwertepaare n	Mittlerer Staubgehalt x mg/m ³	Standardabweichungen S _D mg/m ³	Unsicherheitsbereich U (95 %) mg/m ³
Staubtestkanal	< 5	8	2,6	0,24	0,55
Müllverbrennungsanlage	< 10	12	2,1	0,33	0,72
Braunkohlefeuerung	10 bis 25	8	17,6	0,68	1,57

Einige wesentliche Kriterien der Staubmessung lassen sich kurz zusammenfassen:

- ausreichende Ein- und Auslaufstrecken
- Aufteilung des Messquerschnittes in gleiche Teilflächen
- geschwindigkeitsgleiche Absaugung an jedem Teilpunkt
- Vermeidung von Kondensatbildung

2.2 Messen der Korngrößenverteilung

Die Messung der Korngrößenverteilung wurde vereinbarungsgemäß mit dem in der Richtlinie VDI 2066, Bl. 5 [5] beschriebenen Kaskadenimpaktor durchgeführt.

Diese Messtechnik wird nachfolgend näher erläutert.

2.2.1 Grundlagen

Als Basis für die Bewertung der Korngröße wird der aerodynamische Durchmesser herangezogen. Der aerodynamische Durchmesser beschreibt das Verhalten der Partikel im gasgetragenen Zustand und gilt insbesondere für Partikel > 0,3 µm. Der aerodynamische Durchmesser ist definiert als der Durchmesser einer sinkgeschwindigkeitsgleichen kugelförmigen Partikel mit der angenommenen Normdichte von 1 g/cm³.

Bei den Untersuchungen wurde ein Andersen Mark III Impaktor eingesetzt. Die nachfolgenden allgemeinen Ausführungen sind aber auch für andere Typen gültig. Ausführlich werden die Grundlagen in der VDI 2066, Blatt 5 beschrieben. Grundlegende Untersuchungen zur Messung der Korngrößenverteilung in Abgasen wurden von Lützke im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes [6] durchgeführt. Auch in diesem Vorhaben wurde der Mark III eingesetzt, da er eine gute Wiedergabe der Partikelgrößenverteilung ergibt.

Bei der Impaktion wird die unterschiedliche Trägheit von Partikeln ausgenutzt. Eine Impaktorstufe besteht prinzipiell aus den Elementen Düse und Prallplatte. Die Partikel besitzen eine größere Trägheit als das Gas und können daher der umgelenkten Gasstromlinie nicht in gleichem Maße folgen. Partikel mit ausreichender Trägheit des in der Düse beschleunigten Partikelkollektivs treffen auf die Prallplatte und werden dort auf einem Sammeltefilter gesammelt. Im Bild ist das Prinzip der Impaktion dargestellt.

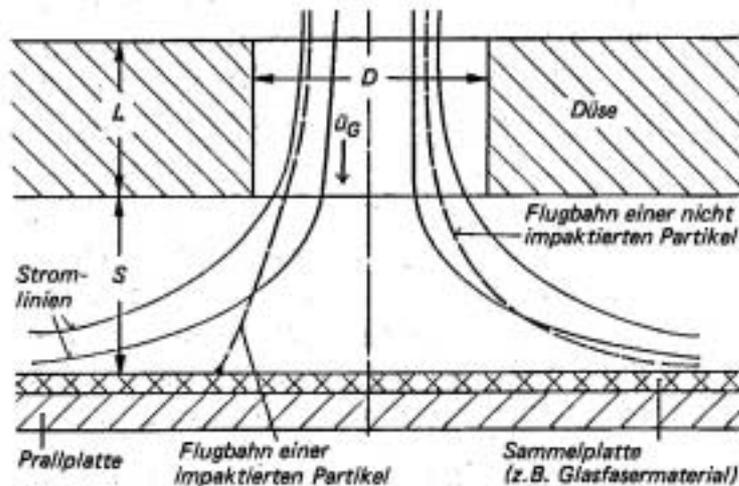


Abb. 3: Prinzip der Impaktion

Die wichtigsten Abmessungen des Systems, von denen die Fraktionierung abhängig ist, sind die Düsenweite D , die Düsenlänge L und der Abstand zwischen Prallplatte und Düse S .

Kaskadenimpaktoren bestehen aus hintereinandergeschalteten Impaktorstufen, die so ausgelegt sind, dass in den nachfolgenden Stufen Partikel geringerer Trägheit abgeschieden werden und somit Fraktionen unterschiedlicher Partikelgröße erhalten werden. Durch eine Verringerung der Düsenweite von Stufe zu Stufe erhöht sich die Geschwindigkeit des durchgeführten Gas-/Partikelstromes. Somit werden immer kleinere Partikel abgeschieden. Die nicht abgeschiedenen Partikel werden auf einem hinter der letzten Impaktionsstufe angeordneten Endfilter gesammelt. Es wird davon ausgegangen, dass alle abgeschiedenen Teilchen auch auf den Filtern haften bleiben.

Der grundlegende Aufbau bei der Probenahme mit dem Impaktor ist vergleichbar mit der normalen Staubmessung. Die Absaugung hat geschwindigkeitsgleich unter Beachtung der VDI 2066, Blatt 1 [1] zu erfolgen. Im Gegensatz zur Gesamtstaubmessung darf aber bei der Ermittlung der Korngrößenverteilung die Absauggeschwindigkeit nicht verändert werden, da sich sonst die Abscheidcharakteristik des Impaktors ändert. Es sollten daher Messquerschnitte mit annähernd gleicher Geschwindigkeitsverteilung ausgewählt werden.

In die Trennwirkung einer Stufe gehen die Gasgeschwindigkeit in den Düsen, die dynamische Viskosität, die Teilchendichte, die Stokeszahl (beschreibt die Bewegung der Partikel in der Strömung) und der Cunningham-Faktor ein.

Nachfolgend ist der Aufbau des Andersen Mark III dargestellt.

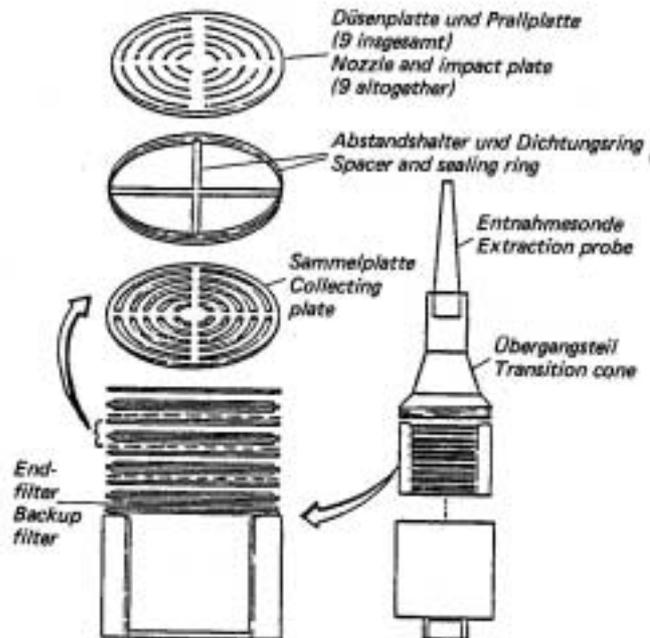


Abb. 4: Aufbau des Impaktors Andersen Mark III

Die Geschwindigkeit in den Düsen wird durch die abgesaugte Gasmenge und die Geometrie vorgegeben. Die Trennwirkung einer Stufe lässt sich über folgende Gleichung darstellen:

$$d_{ae50}(i) = K_1(i) * K_2 * \sqrt{\frac{1}{C(d_{ae50}(i))}}$$

K_1 ist für die Impaktionsstufe i eines vorgegebenen Impaktors eine von den jeweiligen Messbedingungen unabhängige Konstante.

In K_2 gehen die Messbedingungen ein; aber K_2 ist für alle Impaktionsstufen gleich.

$$K_1(i) = \sqrt{\frac{9 * \pi * St_{50}(i) * D_i^3 * N_i}{4 * \rho_o}}$$

$$K_1(i) = 4,287 * 10^{-2} * \sqrt{D_i^3 * N_i}$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{\mu_G}{V_m}}$$

Hierbei bedeuten:

C	Cunninghamfaktor (wird iterativ berechnet)
$St_{(50)}$	Stokeszahl, gemäß [6] 0,26
$D_{(i)}$	Düsensdurchmesser der Impaktorstufe i [m]
$N_{(i)}$	Düsenanzahl der Impaktorstufe;
ρ_o	Einheitsdichte 1000 [kg/m ³]
μ_g	dynamische Viskosität des Gases (abhängig von T und Gaszusammensetzung)
[kg/ ms]	
V_m	Volumenstrom durch den Impaktor, im Betriebszustand [m ³ / s]

d_{ae50} ist der aerodynamische Durchmesser der Korngröße, die zu 50 % auf einer Impaktorstufe abgeschieden wird.

Mittels dieser Formeln wird aufgrund der Vorinformationen (welche Fraktionierung getroffen werden soll, Abgasbedingungen, zu erwartender Staubgehalt) für die Durchführung der Messung der Durchmesser der Entnahmesonde und das ungefähr abzusaugende Gasvolumen und die Messdauer abgeschätzt. Nach Vorliegen der Messergebnisse wird mit den tatsächlichen Messdaten der für jede Stufe erreichte d_{ae50} berechnet. Die Trennkurven der Impaktorstufen entsprechen im Allgemeinen nicht direkt den zu messenden Größen von PM₁₀ und PM_{2,5}. Durch Interpolation zwischen den Trennstufen lassen sich aber PM₁₀ und PM_{2,5} ermitteln.

2.2.2 Durchführung der Messungen

2.2.2.1 Vorbereitung

Die übliche Messplanung gemäß VDI 2448 Blatt 1 [7] ist, insbesondere in Bezug auf die Probenahmebedingungen, besonders umfangreich durchzuführen. Hierzu gehören genaue Angaben zur Messstelle und zu den Messöffnungen (3"-Durchmesser), die zu erwartende Staubkonzentration (die Probenahmedauer ist u.a. vom Staubgehalt im Abgas abhängig), die Abgastemperatur (Filter müssen entsprechend der Abgastemperatur vorbehandelt werden), die Abgasfeuchte bzw. Taupunkttemperatur und die Strömungsverteilung im Abgas.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Vorbereitung der Messausrüstung zu widmen. Bei größeren Messungen ist es aufgrund der Vielzahl von Filtern, die bei Impaktormessungen anfallen können, unbedingt notwendig eine Systematik aufzustellen, um Verwechslungen vorzubeugen und z.B. Fehler bei der Zusammenstellung zu erkennen.

Ferner bedarf das Reinigen der Impaktoren besonderer Sorgfalt. Sonden, Düsenplatten, Dichtringe etc. werden im Ultraschallbad vor jedem Einsatz gereinigt, mit destilliertem Wasser nachgespült und getrocknet. Im Anschluss werden insbesondere die Abstandshalter auf Beschädigung visuell geprüft.

2.2.2.2 Durchführung der Probenahme

Die Probenahme erfolgt als Netzmessung gemäß Richtlinie VDI 2066, Blatt 1 [1]. Da der Impaktionswirkungsgrad von der Absauggeschwindigkeit abhängig ist, muss im Gegensatz zur Gesamtstaubmessung der Gasdurchsatz während einer Messung konstant gehalten werden, um die Abscheidegrenzen nicht zu verschieben. Daraus folgt, dass nicht an allen Messpunkten die Probenahme isokinetisch erfolgt, sondern mit einer über alle Messpunkte gemittelten Isokinetik durchgeführt wird.

Bei starken Unterschieden in der Geschwindigkeitsverteilung kann eine Netzmessung nicht mit einem einzigen Messvorgang durchgeführt werden. Evtl. ist eine Parallelmessung mit einem zweiten Impaktor erforderlich.

Die Dauer der Probenahme ergibt sich aus folgenden Randbedingungen:

- Staubgehalt im Abgas
- Beladbarkeit des Impaktors
- Mögliche Absauggeschwindigkeit
- dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen

Der Zeitraum der Probenahme errechnet sich bei vorgegebenem Probenahmenvolumen (Nm^3/h) aus der Staubkonzentration im Abgas und der Beladbarkeit des Impaktors. Bei der Berechnung sind mögliche Wandverluste (Entnahmesonde, Übergangsteil) zu berücksichtigen. Eine Überschlagsformel findet sich in der VDI 2066, Bl.5. Geht man von den unten genannten wünschenswerten Beladungen aus, kommt man bei niedrigen Staubkonzentrationen zu langen Messzeiten die vielfach schwer zu realisieren sind.

In der VDI-Richtlinie werden folgende Richtwerte für die Beladung eines Kaskadenimpaktors angegeben:

Beladung	untere Grenze mg	bester Bereich mg	obere Grenze mg
je Stufe	2	6 bis 10	20
bzw. für 7-stufigen Impaktor	10	40 bis 70	100

Nach unserer Erfahrung an mehreren Anlagen mit Staubgehalten von $< 1 \text{ mg/m}^3$ können in Ausnahmefällen auch geringere Beladungen (ca. $0,5 \text{ mg/Stufe}$ bzw. ca. 5 mg Gesamtbeladung) zu auswert- und reproduzierbaren Ergebnissen führen. Bei diesen geringen Staubbeladungen sind mehrere Parallelmessungen sinnvoll, um Ausreißer zu erkennen und Messunsicherheiten abzuschätzen.

Bei geringen Staubgehalten ist es nur begrenzt möglich, die Probenahmezeiten durch Erhöhung der Absauggeschwindigkeit zu reduzieren.

Die in den einzelnen Stufen des Impaktors abgeschiedenen Staubmassen sind in erster Linie von der Absauggeschwindigkeit abhängig. Um eine ausreichende Aufteilung der Partikelgrößen bis PM_{10} zu erhalten, wäre unter Berücksichtigung der isokinetischen Probenahme überschlägig ein maximaler Volumenstrom im Impaktor von $< 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (im Betriebszustand) bei z.B. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ Abgastemperatur anzustreben.

Anlagen mit Gewebefilter haben oftmals äußerst geringe Staubgehalte im Abgas. Daraus ergeben sich für die Ermittlung der Korngrößenverteilung lange Probenahmezeiten. Sofern diese langen Probenahmezeiten in der Praxis nicht zu realisieren sind, ist in Abhängigkeit von dem Ziel der Untersuchung zu klären, an welcher Stelle vertretbare Kompromisse eingegangen werden können.

Maßnahme:	Folge:
Erhöhung des Volumenstromes im Impaktor:	Die Durchgangssummenkurve endet bei einem kleineren Wert als PM ₁₀ . Der PM ₁₀ -Wert wäre nach Möglichkeit zu extrapolieren.
Verringerung der Probenahmezeit:	Erhöhung der Messunsicherheit aufgrund einer geringeren Beladung im Impaktor
Reduzierung der Anzahl der Messungen:	Ungenauere Statistik, Ausreißer schwieriger erkennbar

Bei hoher Abgasfeuchte (Taupunkttemperatur liegt nur wenig über der Abgas-Temperatur) muss der Impaktor genügend vorgeheizt werden, was sich in der Praxis wegen der hohen Masse des Impaktors schwer realisieren lässt.

Nach jeder Messung werden die Einsätze vor dem Zerlegen visuell auf Dichtheit geprüft. Falls die Staubablagerungen auf den Sammelplatten (Glasfaserfilter) nicht deutlich abgegrenzt sind, ist auf eine Überlagerung der entsprechenden Stufe zu schließen. Daraus kann eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung resultieren.

Lose auf den einzelnen Stufen des Kaskadenimpaktors liegender Staub wird abgepinselt und zur entsprechenden Probe gegeben. Beim Entnehmen der Sammelplatten (Glasfaserfilter) kleben diese gelegentlich an den Düsenplatten. Das noch anhaftende Filterpapier wird vorsichtig abgepinselt und den jeweiligen Proben zugegeben. Das Ankleben wird häufig in der Literatur erwähnt. Eine generelle Ursache ist für uns bisher nicht erkennbar.

Der Effekt tritt bei Filtermaterial aus der gleichen Charge, bei gleichen Abgasbedingungen und Dauer der Messungen sowie beim Wechseln der Filter im warmen und kaltem Zustand unterschiedlich auf. Zu beachten ist auch, dass die Düsenplatten und Filter nicht mit den bloßen Fingern berührt werden.

2.2.2.3 Messunsicherheiten

Es wird beim TÜV Süddeutschland eine Analysenwaage mit einer Auflösung von 0,01 mg (Reproduzierbarkeit unter den Wägebbedingungen: $\pm 0,03$ mg) verwendet. Der mögliche Wägefehler ist daher klein im Vergleich zum Einfluss von Störeffekten, die Massenveränderungen der Sammelmedien bewirken. Da die Masse der Sammelmedien (ca. 140 mg) sehr viel größer ist als die gesammelte Partikelmasse (z.B. 0,5 mg/Stufe bzw. 0,4 Gew.%) genügen relativ kleine Änderungen der Masse der Sammelmedien, um große Messfehler bei den Partikelmassen hervorzurufen. Es können folgende Ursachen für unerwünschte Massenveränderungen der Glasfasersammelmedien genannt werden:

1. Mechanische Unbeständigkeit der Filter
2. Thermische Unbeständigkeit der Glasfasersammelmedien
3. Wechselwirkung mit der Gasphase bei der Probenahme

Die Probenahme ist mit einer konstanten Absauggeschwindigkeit über alle Punkte (Netzmessung) durchzuführen. Dies führt unweigerlich dazu, dass nicht an allen Punkten die Probenahme isokinetisch erfolgen kann. Gemäß Richtlinie VDI 2066, Blatt 5 ist eine Abweichung von 30 % zulässig. Generell lässt sich feststellen, dass an Messpunkten mit einer geringeren Abgasgeschwin-

digkeit eine Verschiebung zu groben Partikeln und an Messpunkten mit höherer Abgasgeschwindigkeit eine Verschiebung zu feineren Partikel erfolgt. Je höher der Feinanteil ist, desto geringer tritt dieser Effekt in Erscheinung.

In Abgaskanälen mit ungleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung ist daher, insbesondere bei Emissionen mit hohem Staubanteil von Partikeln $> 5 \mu\text{m}$, mit einer erhöhten Messunsicherheit zu rechnen.

Bei Impaktormessungen treten im Vergleich zu Gesamtstaubmessungen immer Staubverluste auf. Diese können teilweise durch s.g. Wandverluste erklärt werden.

Insbesondere im Einlaufkonus des Impaktors kann ein Teil der Partikeln an den Wandungen abgeschieden werden. Man spricht hierbei von „Wandverlusten“. Darunter wird die Masse aller Partikeln verstanden, die nicht auf den Niederschlagsplatten abgeschieden werden. Auch zwischen den einzelnen Stufen sind nicht beabsichtigte Ablagerungen möglich. Erkennbar sind Verluste aus dem Vergleich der Gesamtstaubmessung mit der Summe der Impaktor Einzelfractionen

Wandverluste sind gemäß [6] von der Staubart und der Partikelgröße abhängig und nehmen mit zunehmender Größe der Partikel zu. Eine Gesamtstaubmessung parallel zur Impaktormessung muss unbedingt erfolgen.

Staubverluste sind nicht zu vermeiden. Nach wie vor stellt sich die Frage, zu welcher Fraktion und zu welchem Anteil Verluste zuzuordnen sind. Wäre der Verlust als Funktion der Partikelgröße bekannt, könnte eine rechnerische Korrektur des Staubverlustes über den Gesamtstaubgehalt relativ einfach erfolgen.

3 Zusammenfassung

In der Zusammenfassung ist eine kurze Übersicht über die untersuchten Anlagen, die ermittelten Korngrößenverteilungen und die Bewertung der Ergebnisse zusammengestellt.

3.1 Übersicht über die untersuchten Anlagen

Anlagentyp	Messstellen	Abgasreinigung
Zementwerke		
Lepolofen	Ofenabgas	Elektrofilter
Lepolofen	Klinkerkühlerabgas	Elektrofilter
Wärmetauscherofen	Ofenabgas - Direktbetrieb	Elektrofilter
Wärmetauscherofen	Ofenabgas - Verbundbetrieb	Elektrofilter
Feinkeramik, Isostatische Presse	Abluft der Absauganlagen	Gewebefilter
Glasindustrie		
Flachglasherstellung	Abluft Glasschmelzwanne	Kalkzugabe Elektrofilter
Behälterglasherstellung	Abluft Glasschmelzwannen	Kalkzugabe 2-stufiger Elektrofilter
Behälterglasherstellung	Abluft Glasschmelzwannen	Kalkreaktor mit Kugelrotor Gewebefilter
Aluminiumschmelzanlagen		
Aluminium- Umschmelzanlage	Abluft Schmelzöfen	Kalkreaktor, Kühler HOK-Zugabe Gewebefilter
Aluminium-Spänetrockner	Abluft Spänetrocknungsanlage	TNV, Kühler, Gewebefilter
Eisengießereien		
Kupolofen	Kupolofen Obergichtabsaugung	Gewebefilter
Induktionsofen	Haubenabsaugung	Gewebefilter
Sandaufbereitung	Furanharz gebundener Sand, Rüttelrost Sandregenerierung	Gewebefilter
Sandaufbereitung	Nassguss, Absaugungen Formsandaufbereitung	Gewebefilter
Kupolofen	Abgas Kupolofen	Zyklon, Venturiwäscher, Rekuperator
Auspacktrommel mit Gusstransport	Abluft von Absaugstellen an Auspacktrommel, Sandförderung, Sandübergaben, Trennmaschinen, 1 Quelle	Gewebefilter
Sandaufbereitung	Absaugung	Elektrofilter
Asphaltmischanlage	Abluft Misch- und Trockentrommel	Gewebefilter
Herstellung von Silizium	Abluft Elektro-Niederschachtöfen	Gewebefilter
Schwerölfeuerung		
Feuerung mit SNCR	Abgas Heizöl-S-Feuerung	Additiv zur Verminderung der Staubemission, Harnstoffeindüsung
Feuerung ohne SNCR	Abgas Heizöl-S-Feuerung	Additiv zur Verminderung der Staubemission

3.2 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung sind prozentual und als absolute Staubwerte in der nachfolgenden Tabelle sowie in der Abb. 5 zusammengestellt. Die in der Tabelle (und in Abb. 6) angegebenen absoluten Korngrößenfraktionen in mg/m³ wurden aus der Gesamtstaubkonzentration unter Verwendung der ermittelten prozentualen Korngrößenverteilung berechnet. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die ermittelte Korngrößenverteilung für den gesamten emittierten Staub zutreffend ist.

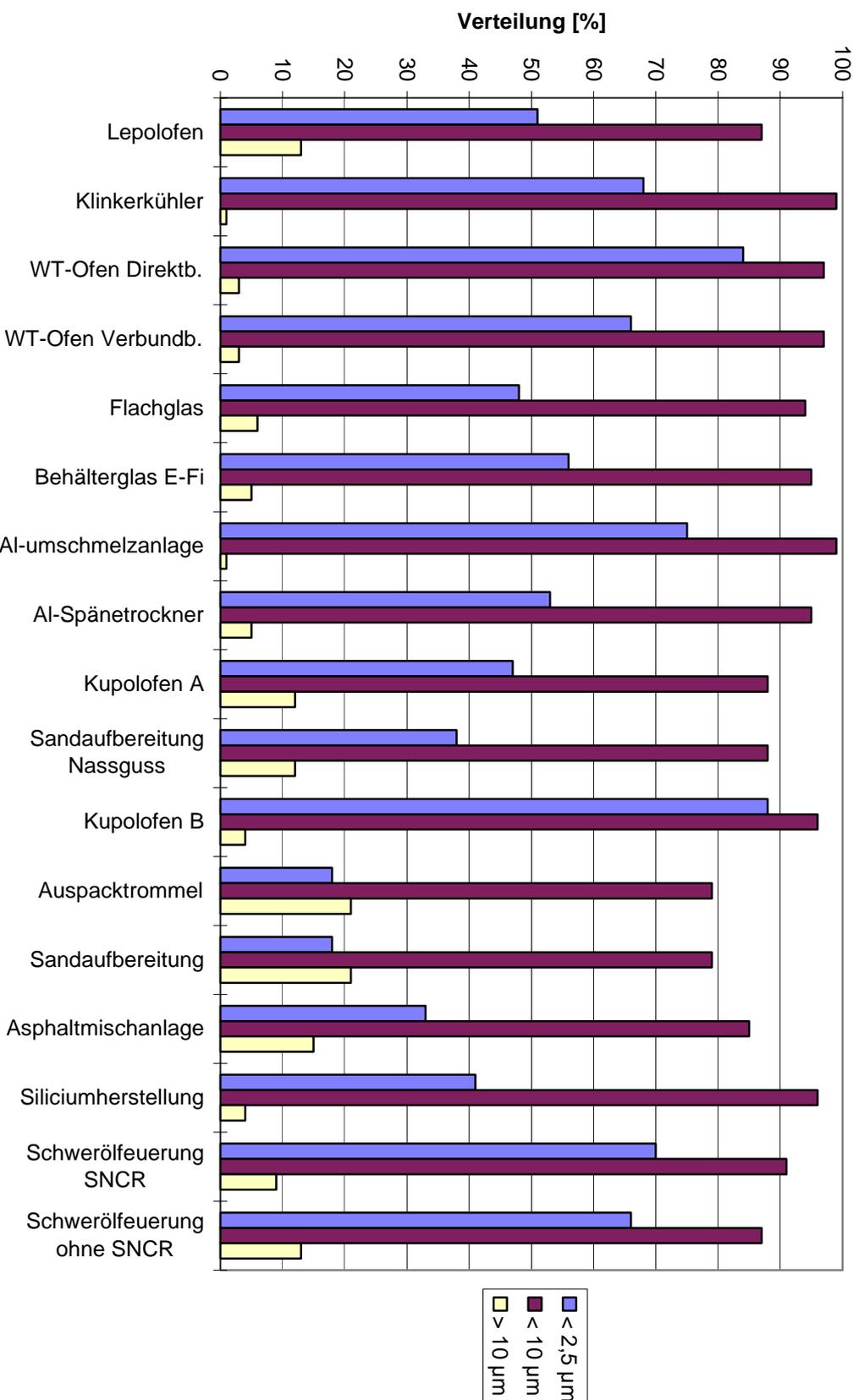
	< 2,5 µm %	< 10 µm %	> 10 µm %	< 2,5 µm mg/ m3	< 10 µm mg/ m3	> 10 µm mg/ m3	Gesamt- staub mg/ m ³
Lepolofen	51	87	13	7,9	13,4	2,0	15,4
Klinkerkühler	68	99	1	9,5	13,9	≤ 0,1	14,0
WT-Ofen Direktbetrieb	84	97	3	1,9	2,2	≤ 0,1	2,3
WT-Ofen Verbundbetrieb	66	97	3	3,2	4,7	≤ 0,1	4,8
Isostatische Presse *)	(60)	(88)	(< 12)	0,04	0,05	<0,04	0,06
Flachglas	48	94	6	2,5	4,8	0,2	5,0
Behälterglas m. Elektrofilter	56	95	5	2,5	4,3	0,2	4,5
Behälterglasherst. mit Gewebefilter *)	-	-	-	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Aluminium-Umschmelzanlage	75	99	1	0,08	0,11	< 0,04	0,15
Aluminium-Spänetrockner	53	95	5	0,3	0,5	< 0,1	0,6
Kupolofen A	47	88	12	3,3	6,2	0,8	7,0
Induktionsofen *)	(50)	(78)	(22)	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,3
Sandaufbereitung Furanharzsand *)	-	-	-	< 0,3	< 0,3	< 0,3	0,3
Sandaufbereitung Nassguss	38	88	12	0,3	0,6	≤ 0,1	0,7
Kupolofen B	88	96	4	59,8	65,3	2,7	68,0
Auspacktrommel	18	79	21	4,0	19	5,4	24,4
Sandaufbereitung	18	79	21	4,0	17,4	4,6	22,0
Asphaltnischanlage	33	85	15	6,3	16,2	2,8	19,0
Siliciumherstellung	41	96	4	0,5	1,3	≤ 0,1	1,4
Schwerölf Feuerung mit SNCR (Volllast)	70	91	9	49	64	6	70
Schwerölf Feuerung ohne SNCR (Volllast)	66	87	13	36	47	7	54

*) Werte in der Grafik nicht berücksichtigt.

Alle weiteren Messwerte finden sich als Mittelwerte in Anlage 2. Dort sind auch die Durchgangs- und Rückstandssummenkurven als Mittel der Einzelmessungen der Korngrößenverteilung dargestellt. In Abb. 5 wurden nur die Anlagen aufgenommen, an denen messbare Ergebnisse (oberhalb der Nachweisgrenze) erhalten wurden.

Entsprechend diesen Messwerten liegt der Anteil an Feinstaub < PM 10 bei ca. 90 %, der Anteil < PM 2,5 bei ca. 50 %. Während aber der Anteil an Feinstaub < PM 10 unabhängig von der Staubkonzentration und von der Anlagenart nur in einem geringen Bereich schwankt (87-99 %) sind bei PM < 2,5 erheblich größere Schwankungen zu finden (18-88 %). Diese Ergebnisse decken sich mit den bei Fachgesprächen im Umweltbundesamt gemachten Angaben und Erwartungen. Auch dort war von einem Feinstaubanteil < PM 10 von ca. 90 % ausgegangen worden.

Abb. 5: Korngrößenverteilung bei verschiedenen Emittenten



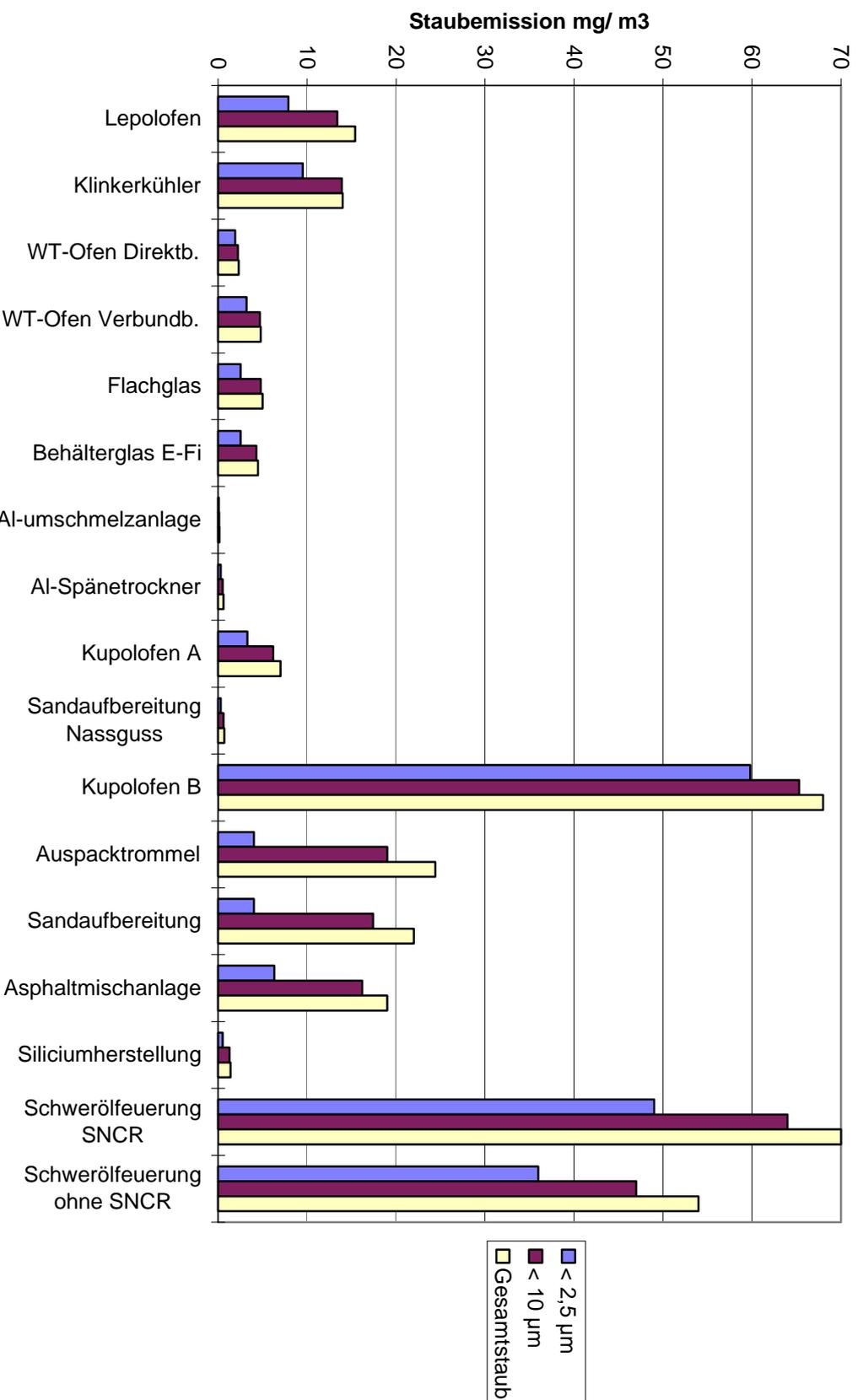
In der Abb. 6 sind die absoluten Werte von Gesamtstaub im Vergleich zu den partikelbezogenen Staubemissionen PM 10 und PM 2,5 der einzelnen Anlagen dargestellt.

Bei den Untersuchungen waren 7 Anlagen mit Elektrofiltern, 11 mit Gewebefiltern, eine mit Zyklon und Nassabscheider und eine ohne Abgasreinigung ausgerüstet. In der folgenden Tabelle sind die Korngrößenverteilungen entsprechend den Staubreinigungsverfahren zusammengestellt.

	Gesamt- staub	< 2,5 µm	< 10 µm	> 10 µm
	mg/ m ³	%	%	%
Elektrofilter				
Lepolofen	15,4	51	87	13
Klinkerkühler	14,0	68	99	1
WT-Ofen Direktbetrieb	2,3	84	97	3
WT-Ofen Verbundbetrieb	4,8	66	97	3
Flachglas	5,0	48	94	6
Behälterglas Elektrofilter	5,5	56	95	5
Sandaufbereitung	22,0	18	79	21
Gewebefilter				
Al-umschmelzanlage	0,11	75	99	1
Al-Spänetrockner	0,5	53	95	5
Kupolofen A	7,0	47	88	12
Sandaufbereitung Nassguss	0,7	38	88	12
Auspacktrommel	24,4	18	79	21
Asphaltemischanlage	19,0	33	85	15
Siliciumherstellung	1,3	41	96	4
Zyklon u. Nassabscheider				
Kupolofen B	68	88	96	4
ohne Staubfilter				
Schwerölfeuerung SNCR	70	70	91	9
Schwerölfeuerung ohne SNCR	52	66	87	13

Ein signifikanter Einfluss der Abgasreinigung auf die Korngrößenverteilung kann hieraus nicht abgeleitet werden. Der Gesamtstaubgehalt bei Anlagen mit Gewebefilter ist zwar im allgemeinen niedriger, die Korngrößenverteilung wird aber offensichtlich nicht beeinflusst.

Abb. 6: Vergleich der Gesamtstaubkonzentration mit der partikelgrößen bezogenen Staubemission



3.3 Bewertung

3.3.1 Messunsicherheiten

Zur Absicherung der Ergebnisse wurden teilweise Parallelbestimmungen durchgeführt. Diese ergaben eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Für die Glasschmelzwanne (Behälterglasherstellung mit Elektrofilter) sind die Ergebnisse von 2 Parallelbestimmungen grafisch als Durchgangs-/ Rückstandssummenkurven dargestellt (Abb. 7).

Ebenso lieferten die Wiederholungsmessungen an Anlagen mit sehr konstanten Betriebsbedingungen gut übereinstimmende Ergebnisse. Dies ist für den Wärmetauscherofen grafisch dargestellt. Aus den verschiedenen Messungen kann eine Unsicherheit für die Korngrößenverteilung von ca. $\pm 6\%$ (absolut) für PM₁₀ und von $\pm 7-8\%$ für PM_{2,5} im Konzentrationsbereich unter 10 mg/m³ Gesamtstaub abgeschätzt werden.

Wie bei allen Impaktormessungen traten auch bei diesen Untersuchungen die in der Literatur beschriebenen Staubverluste im Impaktor im Vergleich zur Gesamtstaubmessung auf. Sie lagen im Durchschnitt bei ca. 47 % (relativ). Es ist daher unbedingt erforderlich bei Impaktormessungen parallele Gesamtstaubmessungen durchzuführen.

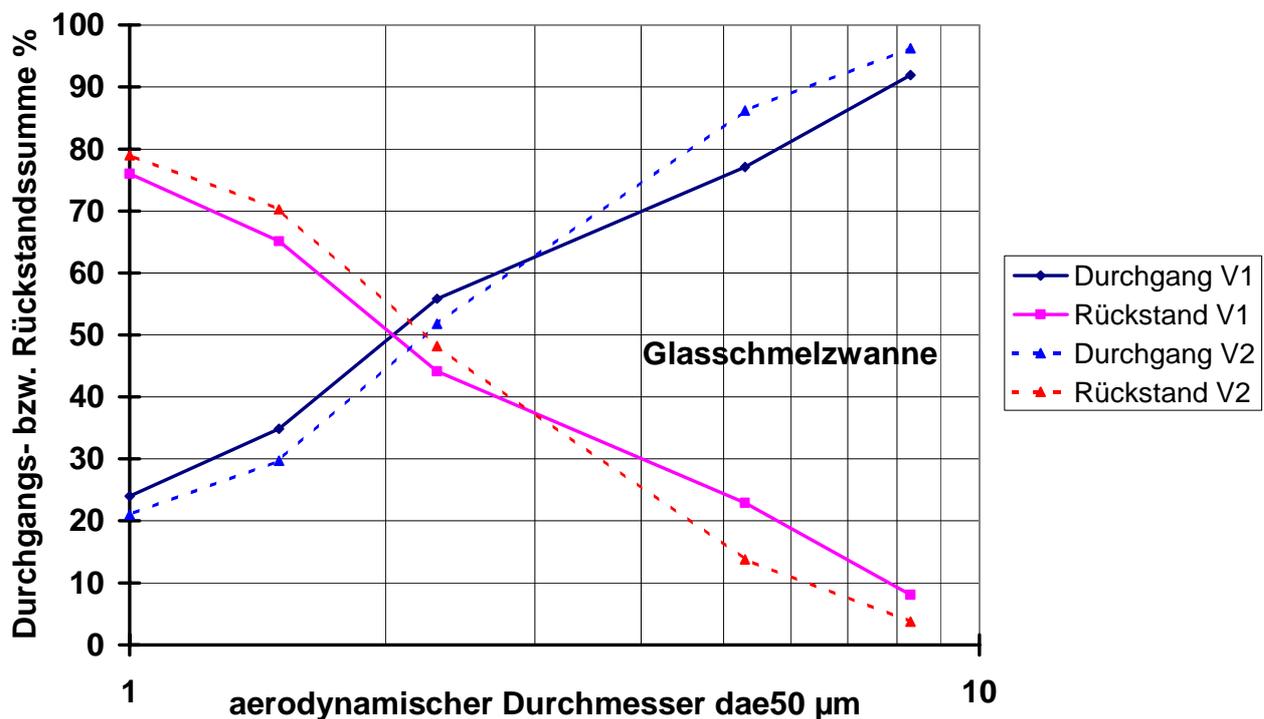


Abb. 7: Ergebnisse von Parallelbestimmungen an der Glasschmelzwanne (Behälterglasherstellung mit Elektrofilter)

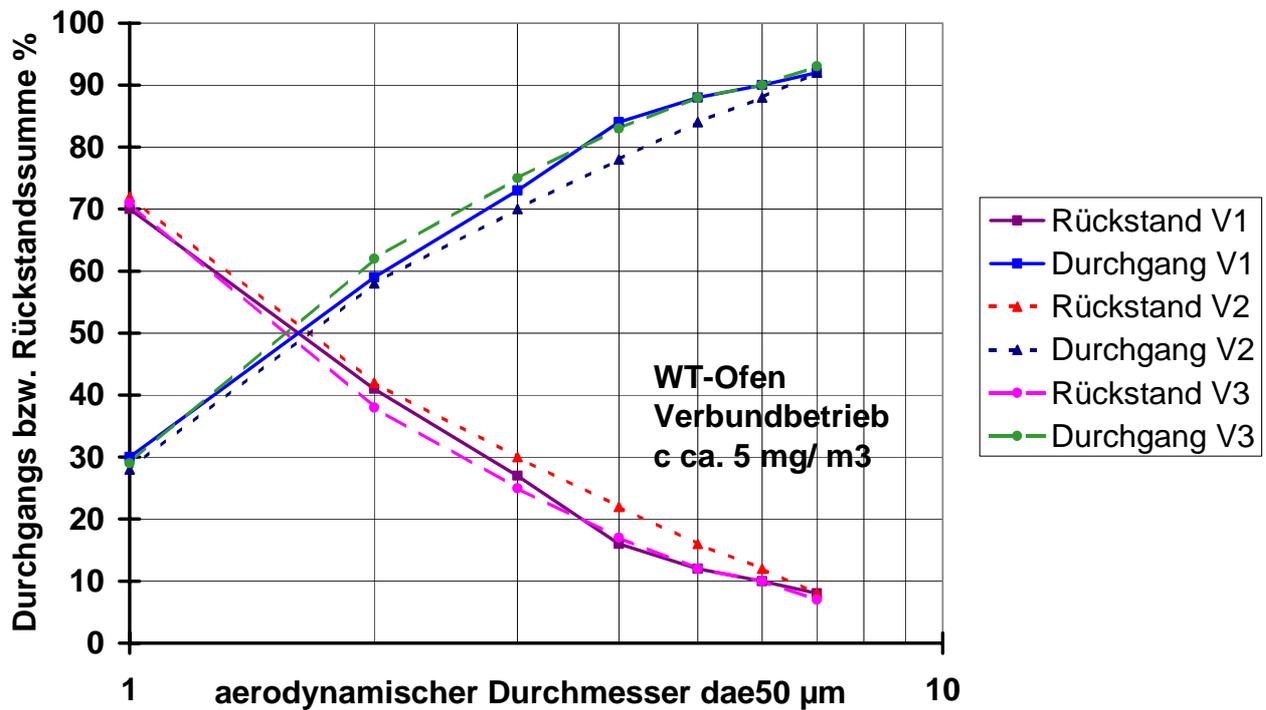


Abb. 8: Ergebnisse von Wiederholmessungen am Wärmetauscherofen:

Ein Vergleich der von uns am Wärmetauscherofen durchgeführten Messungen mit Ergebnissen des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen Anhalt, die an einem Wärmetauscherofen ermittelt wurden, erbrachten ebenfalls gut übereinstimmende Werte obwohl es sich um eine andere Anlage handelte. Dies ist in der folgenden Grafik (Abb. 9) dargestellt (die Messwerte des LfU Sachsen-Anhalt wurden dem Tagungsbericht des VDI Kolloquiums "Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität", (VDI Berichte 1443, 27.-29.April 1999; Referat Chr. Ehrlich, G. Noll, W.-D. Kalkhoff, Messtechnische Ermittlung von PM 10 und PM 2,5-Emissionen aus Industrie-Anlagen und Hausbrandfeuerstätten) entnommen.

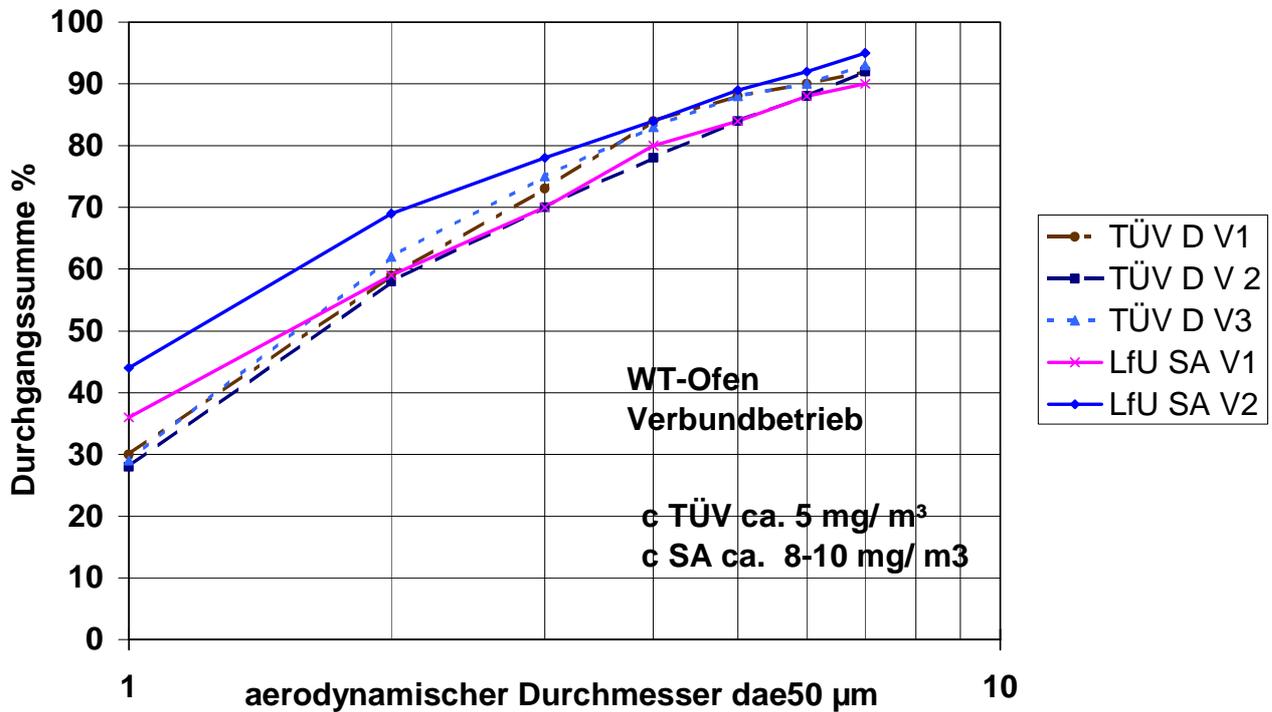


Abb. 9: Vergleich der Korngrößenverteilung von 2 Wärmetauscheröfen im Verbundbetrieb

Die Ergebnisse der Wiederholmessungen an der Sandregenerierung sind in Abb. 10 dargestellt.

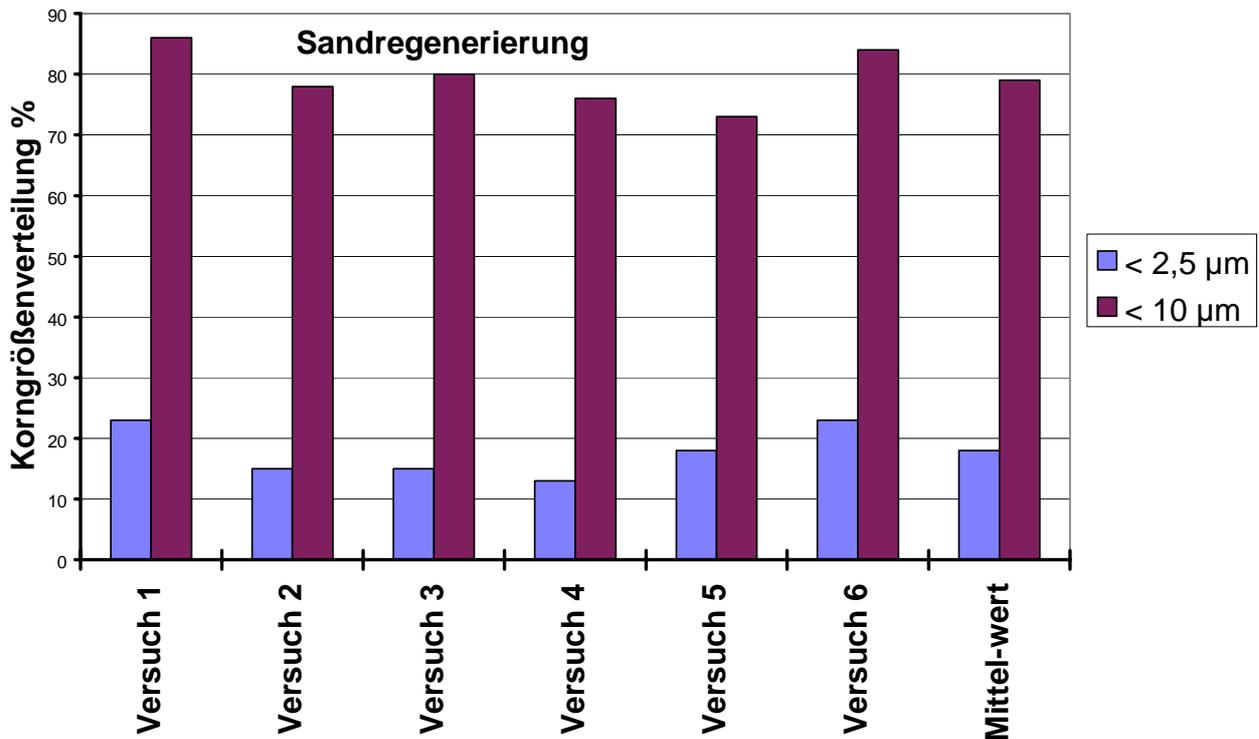


Abb. 10: Ergebnisse von Wiederholmessungen bei unveränderten Betriebsbedingungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die "Grundsatzuntersuchungen über die Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten (< PM 2,5 und < PM 10) für eine Reihe von verschiedenen Anlagen belastbare, plausible Korngrößenverteilungen liefern. Die Untersuchungen bestätigen die allgemeine Erwartung, dass der von Anlagen emittierte Staub zu etwa 90 % < PM 10 ist.

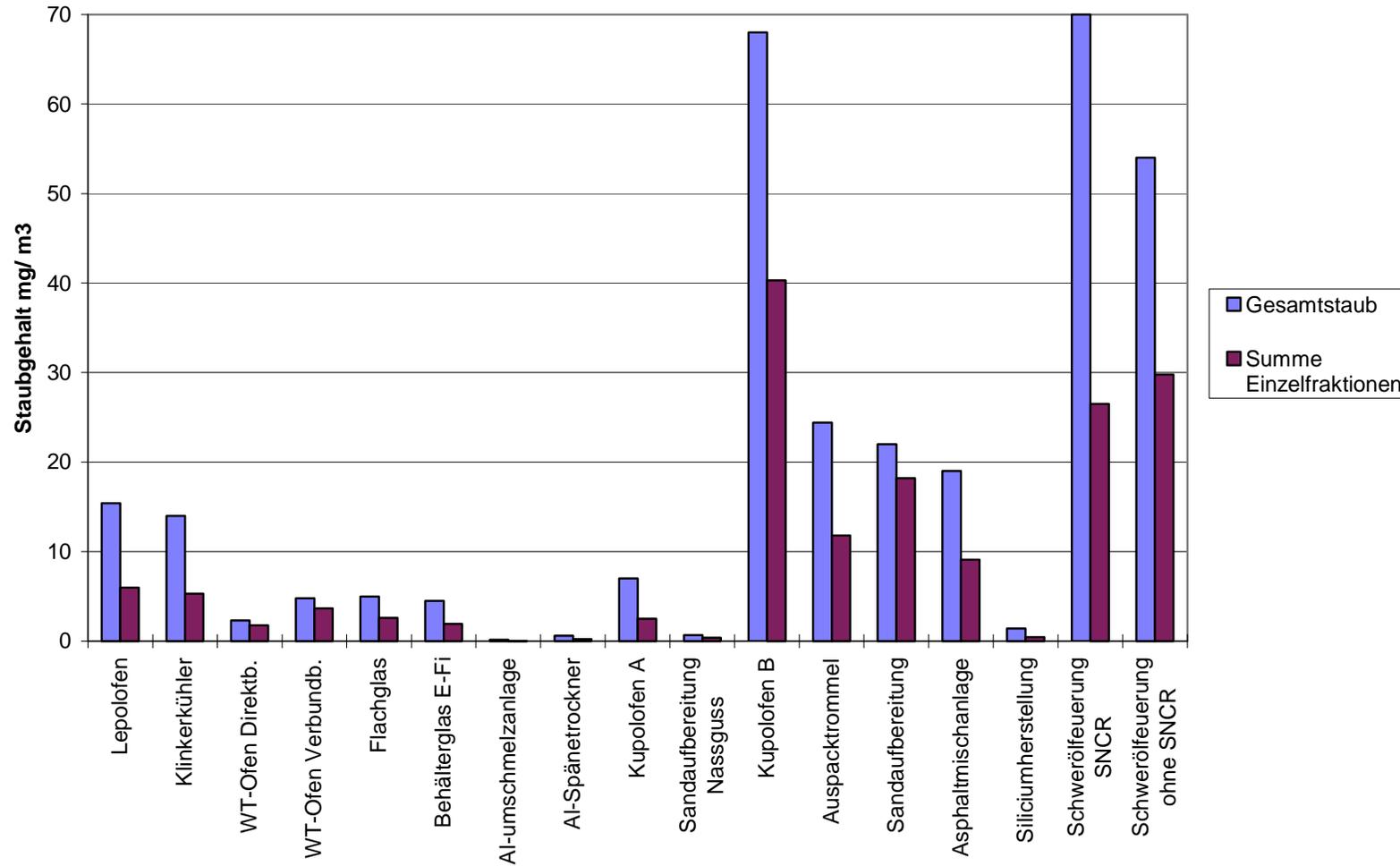
3.3.2 Staubverluste

Staubverluste, wie in Ziffer 2.2.2.2 beschrieben, sind nicht zu vermeiden. Erkennbar sind Verluste aus dem Vergleich der Gesamtstaubmessung mit der Summe der Impaktor Einzelfractionen. Nachfolgende Tabelle und Grafik zeigt die genannten, unterschiedlichen Staubkonzentrationen für jede gemessene Anlage:

Anlage	Gesamtstaub VDI 2066 Bl. 7	Staub über Summe Einzel- fraktionen	Staubverluste
	mg/m ³	mg/m ³	%
Lepolofen	15,4	6,0	61,2
Klinkerkühler	14,0	5,3	62,1
WT-Ofen Direktbetrieb	2,3	1,8	23,0
WT-Ofen Verbundbetrieb	4,8	3,7	23,8
Isostatische Presse *)	0,06	< 0,06	-
Flachglas	5,0	2,6	48,0
Behälterglas m. Elektrofilter	4,5	1,9	57,8
Aluminium-Spänetrockner	0,6	0,2	66,7
Kupolofen A	7,0	2,5	64,3
Induktionsofen *)	< 0,3	< 0,3	-
Sandaufbereitung Furanharzsand *)	0,3	< 0,1	-
Sandaufbereitung Nassguss	0,7	0,4	42,9
Kupolofen B	68,0	40,3	40,7
Auspacktrommel	24,4	11,8	51,6
Sandaufbereitung	22,0	18,2	17,3
Asphaltemischanlage	19,0	9,1	52,1
Siliciumherstellung	1,4	0,4	68,6
Schwerölf Feuerung mit SNCR (Volllast)	70	27	62,1
Schwerölf Feuerung ohne SNCR (Volllast)	52	30	44,8

*) Werte in der Grafik nicht berücksichtigt

Abb. 11: Darstellung der Staubverluste durch Vergleich der Gesamtstaubmessung mit der Summe der Einzelfractionen der Impaktormessung



Gegenüber den nach VDI 2066, Blatt 7 gemessenen Gesamtstaubkonzentrationen sind die aus der Impaktormessung erhaltenen Gesamtstaubkonzentrationen (durch Aufaddition der Einzelfraktionen der Impaktormessung) deutlich niedriger.

Die Verluste lagen zwischen 0 und 87 %, im Mittel bei ca. 50 %. Visuell wurden auch im Einlaufbereich des Impaktors Ablagerungen beobachtet.

Auch in der einschlägigen Literatur [6] wird der Verlust an Staub bei der Impaktormessung bestätigt. Allerdings sollen demnach diese Verluste vorzugsweise im Bereich $> 8 \mu$, vor allem bedingt durch Wandverluste auftreten; bei $3 \mu\text{m}$ -Partikeln sollen die Verluste 5 %, bei $15 \mu\text{m}$ -Partikeln 45 % betragen. Wenn das allgemein zutreffend wäre, würde der Anteil an PM_{10} z.T. tiefer liegen als angegeben. Allerdings fanden die Untersuchungen nach [6] bei durchschnittlich höheren Staubbkonzentrationen statt als bei diesen Messungen. Bei unseren Versuchen war kein offensichtlicher Einfluss der Anlagenart zu erkennen, da diese Verluste auch bei Anlagen auftraten, bei denen nur Feinstaubemissionen zu erwarten sind (nach Gewebefilter). Daher erscheint es fraglich, ob die Angaben in [6] bezüglich der Korngrößenabhängigkeit der Verluste unter den heutigen Anlagenbedingungen noch quantitativ zutreffend sind. Daher wurden die Messwerte nicht mit diesen alten Faktoren korrigiert. Obwohl nach den ersten Messungen nochmals die gesamte Vorgehensweise überprüft wurde, konnten keine offensichtlichen anderen Ursachen für die Verluste gefunden werden, sie blieben trotz sorgfältigster Arbeitsweise auch im weiteren Verlauf erhalten.

Möglicherweise spielt auch die vom Anwender nicht zu beeinflussende Qualität der Filterpapiere eine Rolle (lose Fasern, Anbackverhalten). Quarzfaserfilter haben sich besser bewährt als Glasfaserfilter. Zudem sind Quarzfaserfilter wegen der erheblich niedrigeren Leerwerte bei der Bestimmung der Staubinhaltsstoffe vorzuziehen. Glasfaserfilter weisen diesbezüglich auch große Streuungen von Charge zu Charge auf.

Nach unserer Auffassung können daher keine eindeutigen Korrekturen der Korngrößenverteilung vorgenommen werden und wir gehen davon aus, dass die gefundenen Klassierungen weitgehend zutreffend sind.

3.3.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Messergebnisse zeigen, dass der überwiegende Anteil der Gesamtstaubemissionen nahezu unabhängig von der Konzentration des Gesamtstaubes im Abgas als Feinstaub emittiert wird. Insofern kann generell bei den untersuchten Anlagen durch die Verminderung der Gesamtstaubemissionen ein wesentlicher Anteil der Emissionen an Feinstaub verringert werden.

Dabei tragen Anlagen, die bereits mit hochwirksamen Entstaubern ausgestattet sind, zur Feinstaubbelastung vergleichsweise wenig bei. Insofern sind bei Anlagen mit hochwirksamen Entstaubern (Messwerte für Gesamtstaub $\leq 5 \text{ mg/m}^3$) keine weiteren Minderungsmaßnahmen erforderlich.

Dem gegenüber besitzen z.B. Schwerölfeuerungen einen hohen Gesamtstaubgrenzwert von 80 mg/m^3 . Durch die Zugabe eines Primäradditiv kann dieser derzeit im laufenden Betrieb eingehalten werden. Die Anwendung von hochwirksamen Entstaubern könnte bei diesen Anlagen die Gesamtstaubemissionen und somit die Feinstaubemissionen noch wesentlich reduzieren.

Grundsätzlich kann durch Absenkung des Gesamtstaubgrenzwertes in der TA Luft¹ unter Einbeziehung der möglichen Minderungspotentiale der verschiedenen Anlagentypen die Feinstaubemission im Bereich der Industrieanlagen insgesamt reduziert werden. Hierzu sind für jeden Anlagentyp die verschiedenen Parameter zu prüfen, die einen Einfluss auf die Staubemissionen haben, wie z.B. Einsatzstoffe, Brennstoffe, Verfahren, Handling, Abgasreinigungstechnik.

In Gebieten, in denen eine Überschreitung des Immissionsgrenzwertes für Feinstaub ermittelt wird, ist zu prüfen, inwieweit dort durch spezielle oder weitergehende Anforderungen an Verkehr, Hausbrand und Industrie, wie z.B. Verbrennung von staubarmen Brennstoffen, Feinstaubemissionen reduziert werden können.

3.3.4 Literatur

- [1] VDI 2066, Blatt 1, Messen von Partikeln, Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung; Übersicht; 10/75
- [2] VDI 2066, Blatt 2, Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung; Filterkopfgeräte (4 m³/h, 12 m³/h); 08/93
- [3] VDI 2066, Blatt 3 Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung; Filterkopfgeräte (40 m³/h); 01/94
- [4] VDI 2066, Blatt 7, Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte; Planfilterkopfgeräte; 08/93
- [5] VDI 2066, Blatt 5, Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen; Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskaden-Impaktor; 11/94
- [6] UBA F&E 81-104 02 121; Erprobung von Emissionsmessverfahren zur Feststellung von Korngrößenfraktionen; Bericht des RW TÜV v. Okt. 1981
- [7] VDI 2448, Blatt 1, Planung von stichprobenartigen Emissionsmessungen an geführten Quellen; 04/92

¹ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 27.02.1986 (GMBI. S. 95)