

**Bericht über
„Grundsatzuntersuchung über die Ermittlung
der Korngrößenverteilung im Abgas
verschiedener Emittenten (< PM 2,5 und < PM
10)“**

**Projekt II:
Anlagen der Chemieindustrie, Raffinerien, Automobilindustrie,
Holzindustrie und Tierhaltungen**

Dezember 2000

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

Auftragnehmer TÜV Süddeutschland
Bau und Betrieb GmbH
Fachbereich Umwelt Service
Westendstr. 199
80686 München

Art der Messung Emissionsmessung

Vertrag Az. 1/6-100-72/99

Auftragsdatum 11.10.1999

Zeit der Messungen IV. Quartal 1999 u. I/II. Quartal 2000

Projektgruppe: Dr. Richard Schlachta, Robert Behm (LfU)
Dr. Alfred Brandl, Heinrich Samhammer,
Andreas Pressler, Josef Strobl, Johann Schmidt
(TÜV Süddeutschland)



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	3
2 Aufgabenstellung	6
3 Messung von Staub und der Korngrößenverteilung	6
3.1 Gesamtstaub	7
3.2 Messen der Korngrößenverteilung	9
4 Zusammenfassung	17
4.1 Beschreibung der Anlagen	17
4.2 Messergebnisse (Korngrößenverteilung - Staubgehalt)	17
4.3 Bewertung der Messergebnisse - Staubverluste	21
4.4 Literatur	25

1 Einleitung

Staub gehört zu den klassischen Luftschadstoffen, für die im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sowohl immissions- (22. BImSchV, TA Luft) als auch emissionsseitige Begrenzungen (17. BImSchV, 13. BImSchV, TA Luft) existieren. Beispielsweise bewegte sich im Jahr 1999 in Bayern die durch das Lufthygienische Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB) gemessene mittlere Schwebstaubbelastung (Staubteilchen mit einem Durchmesser kleiner 70 µm) bei der Mehrzahl der Messstationen im Bereich zwischen ca. 30 µg/m³ und ca. 40 µg/m³ [1]. Lediglich an verkehrsnahen Stationen wurden höhere Immissionen gemessen (höchster Jahresmittelwert: 68 µg/m³). Die Immissionsgrenzwerte für Schwebstaub gemäß der 22. BImSchV betragen 150 µg/m³ (arithmetischer Jahresmittelwert aus Tagesmittelwerten) bzw. 300 µg/m³ (98%-Wert der Summenhäufigkeit der während des Jahres gemessenen Tagesmittelwerte).

Nachdem beim Menschen eine Abscheidung der Partikel in den einzelnen Bereichen des Atemtraktes in Abhängigkeit der Partikelgröße erfolgt, unterscheidet man bei dem Schwebstaub folgende Anteile [2]:

- Einatembarer Anteil: Anteil an allen in der Luft vorhandenen Partikeln, die durch Mund oder Nase eingeatmet werden können
- Thorakaler Anteil: Anteil aller eingeatmeter Partikeln, die über den Kehlkopf hinaus in den Atemtrakt (Brustkorb) gelangen
- Alveolengängiger Anteil: Anteil der Partikeln, die bis in den innersten Bereich des Atemtraktes, den Alveolarraum, vordringen.

Als Feinstaub wird der alveolengängige Anteil des Staubes verstanden. Die Partikelgrößen werden über den sog. aerodynamischen Durchmesser (d_{ae}) beschrieben. Darunter versteht man den Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 (1 g/cm³), welche in ruhender oder laminar strömender Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das betrachtete Partikel besitzt. In Abhängigkeit von ihrem aerodynamischen Durchmesser können die Partikeln unterschiedlich weit in den Atemtrakt gelangen und sich dort ablagern: je kleiner sie sind, desto tiefer können sie über Mund oder Nase bis zu den Lungenbläschen vordringen und umso länger ist ihre Verweilzeit.

Unter PM₁₀ (PM = „**P**articulate **M**atter“) werden messtechnisch die Partikeln verstanden, die einen größenselektierten Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist. Bei PM_{2,5} handelt es sich entsprechend um Partikel, die einen größenselektierten Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist [3]. PM₁₀ beschreibt näherungsweise die Fraktion, die mit mittlerer Wahrscheinlichkeit in den Tracheo-Bronchialbaum und den Alveolarbereich eindringt (thorakaler Anteil); PM_{2,5} die Fraktion, die mit mittlerer Wahrscheinlichkeit in den Alveolarbereich gelangt.

Neuere Untersuchungen [4, 5, 6] haben gezeigt, dass insbesondere von Feinstaub eine bislang unterschätzte Gefahr für die menschliche Gesundheit ausgeht. Epidemiologische Studien ergaben einen deutlichen Zusammenhang zwischen Partikelimmissionen mit Beeinträchtigungen der Atemwege (Atemwegserkrankungen, Verringerung der Lungenfunktion) und vorzeitiger Sterblichkeit. Für eine Reihe von Stäuben (Industrie- und Dieselruß, Quarzstaub, Titandioxid) mit Partikeln in der Größenordnung von 0,01 - 0,05 µm ließ sich eine krebserzeugende Wirkung in der Rattenlunge nachweisen.

Am 22.04.1999 wurde deshalb zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie 96/62/EG die erste Tochterrichtlinie 1999/30/EG über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei verabschiedet, die am 19.07.1999 in Kraft getreten ist [3]. Sie muss bis Mitte des Jahres 2001 in nationales Recht überführt werden und löst die bisher geltenden EU-Richtlinien zur Luftqualität, die über die 22. BImSchV in nationales Recht umgesetzt worden sind, ab. Darin enthalten sind zwei Immissionswerte für PM₁₀-Staub, die vom Jahr 2005 an gelten sollen; ein 24 h-Mittelwert sowie ein Jahresmittelwert. Der 24 h-Mittelwert beträgt 50 µg/m³ und darf im Kalenderjahr nicht mehr als 35 mal überschritten werden. Ab Inkrafttreten der Richtlinie gilt eine Toleranzmarge von 50 %, die sich am 01.01.2001 um 5 µg/m³ und danach jährlich bis zum 01.01.2005 auf 0 % reduziert. Der Jahresmittelwert beträgt 40 µg/m³ mit einer Toleranzmarge von 20 %, die sich am 01.01.2001 jährlich um 1,6 µg/m³ und danach jährlich bis zum 01.01.2005 auf 0 % vermindert. Ab dem Jahr 2005 soll nach Prüfung der Auswirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit und der Machbarkeit eine zweite Stufe mit ab 01.01.2010 gültigen Richtgrenzwerten eingeführt werden, wobei am 01.01.2005 der Jahresmittelwert von 20 µg/m³ eine Toleranzmarge von 50 % besitzt, die sich danach jährlich bis zum 01.01.2010 auf 0 % verringern soll; für den 24 h-Mittelwert von 50 µg/m³ mit noch festzusetzenden Toleranzmargen soll die zulässige Überschreitungshäufigkeit max. 7 mal pro Jahr (98-Perzentil) betragen.

Tabelle 1: Anforderungen der 1. Tochterrichtlinie 1999/30/EG vom 22.04.1999 für Partikel in der Luft [3, 5]

Grenzwert [µg/m ³]	Mittelungszeitraum	Erlaubte Über- schreitungen pro Jahr	Toleranzmarge	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenz- wert zu erreichen ist
Stufe 1				
50	24 Stunden	≤ 35	50 % am 19.07.1999 ¹	01.01.2005 ²
40	Kalenderjahr	keine	20 % am 19.07.1999 ¹	01.01.2005
Stufe 2 ³				
50	24 Stunden	≤ 7	- ⁴	01.01.2010
20	Kalenderjahr	keine	50 % am 01.01.2005 ⁵	01.01.2010

- 1) Die Toleranzmarge verringert sich linear am 01.01.2001 und danach alle 12 Monate um einen gleichen Prozentsatz bis auf 0 % am 01.01.2005.
- 2) Generelle Überprüfung mit Stichtag 31.12.2003. Dann Festlegung von Grenzwerten für 2010 (Angaben für 2010 bislang nur Richtgrenzwerte) und Prüfung, ob für PM_{2,5} Immissionsgrenzwerte eingeführt werden sollen.
- 3) Richtgrenzwerte, die im Lichte weiterer Informationen über die Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt, über die technische Durchführbarkeit und über die bei der Anwendung der Grenzwerte der Stufe 1 in den Mitgliedstaaten gemachten Erfahrungen zu überprüfen sind.
- 4) Wird noch festgelegt.
- 5) Die Toleranzmarge verringert sich linear ab 01.01.2005 und danach alle 12 Monate um einen gleichen Prozentsatz bis auf 0 % am 01.01.2010.

Die wichtigsten anthropogenen Feinstaubquellen sind industrielle Produktionsprozesse, gefolgt vom Verkehr, den Kraftwerken, Industriefeuerungen sowie den Kleinf Feuerungen [4]. Bei den industriellen Verfahren stammen die meisten Feinstaubemissionen aus den Anlagen der Metall erzeugenden und verarbeitenden Industrie, gefolgt von der Steine- und Erden-Industrie. Insbesondere den verkehrsbedingten Feinstaubimmissionen kommt eine große Bedeutung zu, da sie in unmittelbarer Nähe zu Wohn- und Arbeitsbereichen freigesetzt werden und eine bedeutende Quelle für kanzerogene Rußemissionen darstellen.

Da es noch erheblichen Untersuchungsbedarf hinsichtlich einer Quantifizierung des Emissionsanteils von feinen und sehr feinen Partikeln aus Industrie, Gewerbe und Hausbrand

gibt, werden derzeit in den einzelnen Bundesländern unter Koordinierung des Umweltbundesamtes entsprechende Messprogramme zur Ermittlung von Feinstaubemissionen und -immissionen durchgeführt. Auch Bayern ist hierbei intensiv beteiligt. Im Auftrag des LfU wurden von der TÜV Ecoplan Umwelt GmbH branchenbezogene Feinstaubemissionsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse im folgenden für Beispiele aus Raffinerien, Automobil-Serienlackierung, Spanplattenherstellung, Tierhaltungs- und Chemieanlagen dargestellt werden. Feinstaubemissionen aus bayerischen Anlagen der Zementindustrie, Feinkeramik, Glasindustrie, Aluminiumschmelzen, Eisengießereien, Herstellung von Silizium sowie für Schwerölfeuerungen und Asphaltmischanlagen wurden in einem gesonderten Messprojekt ermittelt [7]. Zudem wurden vom LfU an insgesamt 31 Punkten in Bayern PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Immissionsmessungen vorgenommen [8].

2 Aufgabenstellung

Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz sollten in den Abgasen verschiedener Emittenten gemäß dem Messplan Az. 1/6-100-72/99 Emissionsmessungen zur Ermittlung der Korngrößenverteilung und begleitende Messungen verschiedener anderer Abgasinhaltsstoffe und von Abgasrandparametern durchgeführt werden:

a) Korngrößenverteilung nach dem Impaktorverfahren (VDI 2066, Bl.5): Es sollten jeweils 6 Einzelmessungen zur Ermittlung der folgenden Korngrößenverteilung vorgenommen werden:

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

b) Gesamtstaubmessungen: 6 Einzelmessungen während der Bestimmung der Korngrößenverteilung

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

3 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 Staubbemessung werden in der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [9] dargestellt. Die manuelle Staubbemessung wird in den VDI-Richtlinien Blatt 2, 3 und 7 beschrieben [10,11,12]. Die fraktionierende Messung von Staub nach der Korngrößenverteilung mit dem Anderson-Impaktor erfolgt gemäß Richtlinie VDI 2066 Blatt 5 [13].

3.1 Gesamtstaub

Grundlegende Voraussetzung der Staubmessung 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 Staubmesseinrichtung nach VDI 2066 ist nachfolgend dargestellt.

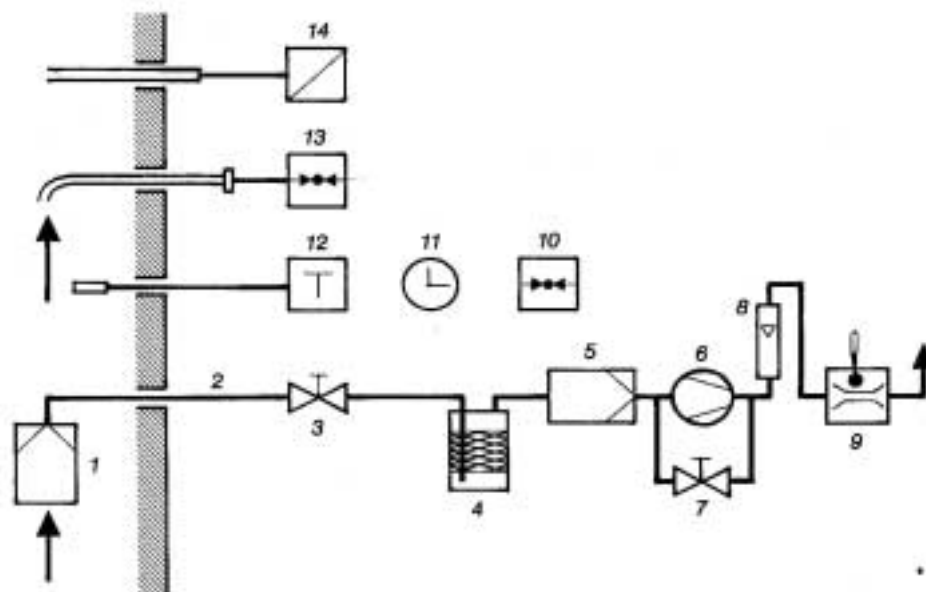


Abb. 1 Aufbauschema einer Probenahmeeinrichtung nach VDI 2066 (Prinzipschema)

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

Für Staubbelastungen im Bereich von 1 mg/m³ bis >100 mg/m³ 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/m³ und es werden Standardabweichungen von 0,4 mg/m³ in der Staubgehaltsklasse 1 bis 10 mg/m³ und von 2,2 mg/m³ in der Staubgehaltsklasse von 100 bis 300 mg/m³ erreicht.

Bei Konzentrationen < 20 mg/m³ sollte aber vorzugsweise nach Blatt 7 gearbeitet werden.

Für Staubgehalte in den Konzentrationen 0,1 bis 20 mg/m³ wurden vom TÜV Rheinland und vom TÜV Bayern Planfilterkopfgeräte entwickelt, die in der Richtlinie VDI 2066, Blatt 7 beschrieben sind. Hier werden zur Staubabscheidung Quarzfaserplanfilter eingesetzt. Diese Geräte haben Nachweisgrenzen von 0,1 bis 0,3 mg/m³ und es sind Standardabweichungen von 0,04 mg/m³ in der Staubgehaltsklasse 0 bis 0,5 mg/m³ und von 0,33 mg/m³ in der Staubgehaltsklasse von 0 bis 10 mg/m³ 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.

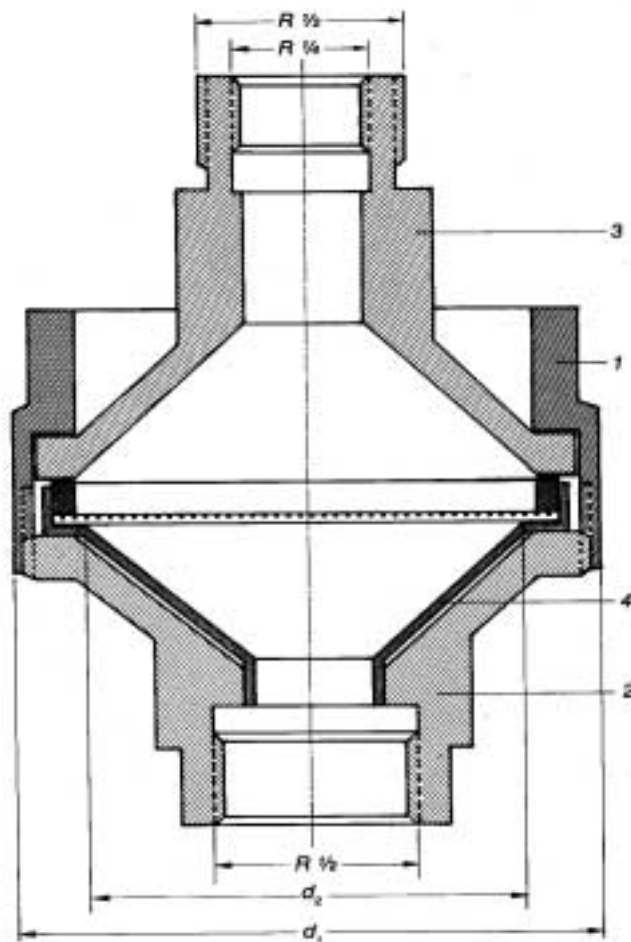


Abb. 2. Planfilterkopf (Ausführungsbeispiel 2) nach VDI 2066, Blatt 7 [5]

- 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 folgenden Tabelle zeigt die für den eingesetzten Planfilterkopf typischen Verfahrenskenngrößen:

Tab. 1 Verfahrenskenngrößen für gravimetrische Staubbestimmung nach VDI 2066, Bl. 7 (Planfilter) [13]

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

3.2 Messen der Korngrößenverteilung

Die Messung der Korngrößenverteilung wurde mit dem in der Richtlinie VDI 2066, Bl. 5 [13] beschriebenen Kaskaden-Impaktor durchgeführt.

Diese Messtechnik wird nachfolgend näher erläutert.

3.2.1 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 [14] durchgeführt. Auch in diesem Vorhaben wurde der Mark III Impaktor 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. Partikeln mit ausreichender Trägheit des in der Düse beschleunigten Partikelkollektivs treffen auf die Prallplatte und werden dort auf einem Sammelfilter gesammelt. Im Bild ist das Prinzip der Impaktion dargestellt.

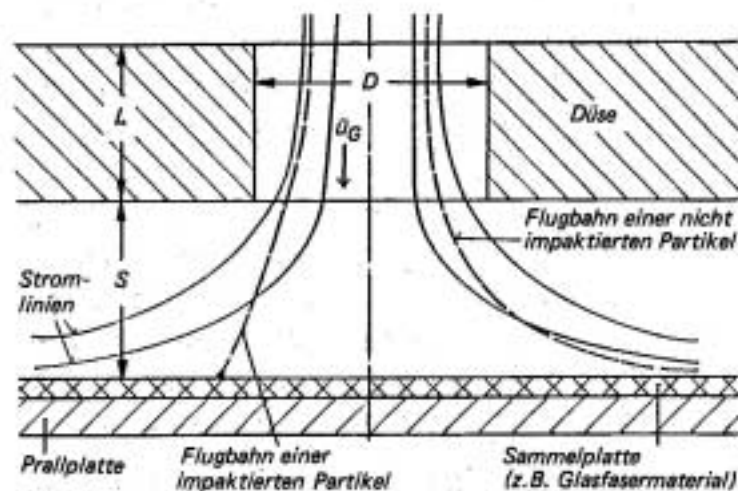


Abb. 4: Prinzip der Impaktion

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 Partikeln 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 Partikeln werden auf einem hinter der letzten Impaktionsstufe angeordneten Endfilter gesammelt. Es wird davon ausgegangen, dass alle abgeschiedenen Teilchen auch auf den Filtern haften bleiben.

Nachfolgend ist der Aufbau des M III dargestellt.

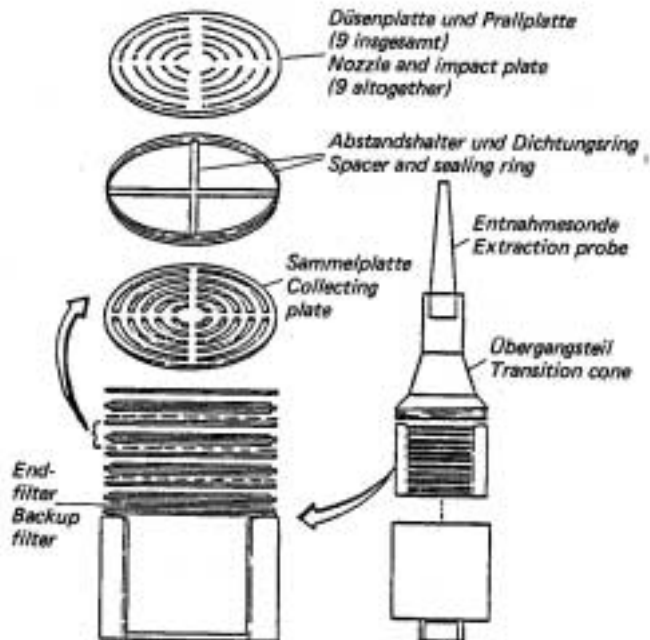


Abb. 5: Aufbau des Impaktors Andersen Mark III

Der grundlegende Aufbau bei der Probenahme mit dem Impaktor ist vergleichbar der normalen Staubbmessung. Die Absaugung hat geschwindigkeitsgleich unter Beachtung der Richtlinie VDI 2066, (Blatt 1 [9]) zu erfolgen. Im Gegensatz zur Gesamtstaubbmessung darf aber bei der Ermittlung der Korngrößenverteilung die Absauggeschwindigkeit nicht verändert werden, da sich sonst die Abscheidecharakteristik 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.

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 Cunnighamfaktor (wird iterativ berechnet)
- $St_{(50)}$ Stokeszahl, gemäß [13] 0,26
- $D_{(i)}$ Düsendurchmesser der Impaktorstufe i
- $N_{(i)}$ Düsenanzahl der Impaktorstufe;
- ρ_o Einheitsdichte 1000 kg/m³
- μ_g dynamische Viskosität des Gases (abhängig von T und Gaszusammensetzung)
- V_m Volumenstrom durch den Impaktor, im Betriebszustand

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.

3.2.2 Durchführung der Messungen

3.2.2.1 Vorbereitung

Die übliche Messplanung gemäß VDI 2448 Blatt 1[15] 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, Dicht-
ringe etc. werden im Ultraschallbad vor jedem Einsatz gereinigt, mit destilliertem Wasser nach-
gespült und getrocknet. Im Anschluss werden insbesondere die Abstandshalter auf Beschädi-
gung visuell geprüft.

3.2.2.2 Durchführung der Probenahme

Die Probenahme erfolgt als Netzmessung gemäß Richtlinie VDI 2066, Blatt 1 [9]. Da der Impakti-
onswirkungsgrad von der Absauggeschwindigkeit abhängig ist, muss im Gegensatz zur Gesamt-
staubmessung der Gasdurchsatz während einer Messung konstant gehalten werden, um die Ab-
scheidengrenzen nicht zu verschieben. Daraus folgt, dass nicht an allen Messpunkten die Probe-
nahme isokinetisch erfolgt, sondern mit einer über alle Messpunkte gemittelten Isokinetik durch-
geführt 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 Probenahmevermögen (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 Staubbelastungen sind mehrere Parallelmessungen sinnvoll, um Ausreißer zu erkennen und Messunsicherheiten abzuschätzen.

Bei geringen Staubgehalten ist es nur begrenzt möglich, die Probenahmezeiten durch eine hohe 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.

3.2.2.3 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 Abgasgeschwindigkeit eine Verschiebung zu groben Partikeln und an Messpunkten mit höherer Abgasgeschwindigkeit eine Verschiebung zu feineren Partikeln 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 sogenannte 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 Einzelfraktionen

Wandverluste sind gemäß [14] 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.

4 Zusammenfassung

4.1 Beschreibung der Anlagen

Anlagen Nr.	Anlagentyp	Messstellen	Abgasreinigung
2.1.2.a 2.1.2.b	Herstellung von Acrylnitrilfasern	Abluft Strömungstrockner 3 Abluft Strömungstrockner 4	Zyklonabscheider Zyklonabscheider
2.1.3	Herstellung von Düngemitteln	Abluft Trockentrommeln	Gewebefilter und Wäscher
2.1.4	Herstellung von Bau-chemie-Produkten	Abluft indirekt beheizter Sprühtrockner	Gewebefilter
2.1.5.a 2.1.5.b 2.1.5.c	Herstellung von aktivierten Bentoniten	<ul style="list-style-type: none"> • Abluft Trockentrommel 3 • Abluft Umlaufrockner 3 • Abluft Bentonit-Mahlrockner GEKO 3 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewebefilter • Zyklonabscheider und Elektrofilter • Elektrofilter
2.2.1	FCC-Anlage einer Erdölraffinerie	Abluft FCC-Anlage	Zyklonabscheider und Elektrofilter
2.2.2	FCC-Anlage einer Erdölraffinerie	Abluft FCC-Anlage	Elektrofilter
2.3.1	Spritzlackierung von Automobilen	Abluft Basislackierung	Venturi-Wäscher
2.3.1	Pulverlackierung von Automobilen	1 Emissionsquelle (wurde wegen zu geringem Staubgehalt aus dem Messprogramm genommen)	Sinterlamellen-Filter
2.4	Herstellung von Spanplatten	Abluft Spänetrockner	Gewebefilter
2.5.1	Masthähnchen-Bodenhaltung	Abluft Stall	keine Abgasreinigung
2.5.2	Legehennen-Käfighaltung	Abluft Stall	keine Abgasreinigung

4.2 Messergebnisse (Korngrößenverteilung - Staubgehalt)

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung sind sowohl prozentual als auch absolut mit der zugehörigen Gesamt-Staubkonzentrationen in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Ebenso ist die Korngrößenverteilung als Grafik dargestellt.

Es handelt sich hierbei um die Mittelwerte, die aus den jeweiligen Einzelmessungen gebildet wurden.

Zur Ermittlung der Massenkonzentrationsanteile der jeweiligen PM-Fractionen, wurde die mit der Impaktormessung gefundene Korngrößenverteilung mit dem Mittelwert der Gesamtstaubmessung multipliziert.

Die Massenkonzentrationsangaben beziehen sich auf trockenes Abgas (273 K, 1013 hPa).

Gesamtstaub und prozentuale Korngrößenverteilung:

Anlagentyp	Gesamtstaub mg/m ³	d _{ae50} < 2,5 µm %	2,5 µm ≤ d _{ae50} < 10 µm %	d _{ae50} < 10 µm %	d _{ae50} ≥ 10 µm % *)
Acrylnitrilfaser	16,9	62,3	30,2	92,5	7,5
Acrylnitrilfaser	8,6	49,1	31,0	80,1	19,9
Düngemittel	13,3	35,7	61,2	96,9	3,1
Bauchemie-Prod.	2,5	17,5	59,4	76,8	23,2
Bentonite	4,7	32,9	43,8	76,7	23,3
Bentonite	29,4	69,5	26,5	96,0	4,0
Bentonite	3,3	50,3	45,7	96,0	4,0
FCC-Anlage	21,0	72,4	25,0	97,3	2,7
FCC-Anlage	2,7	51,8	30,6	82,4	17,6
Spritzlackierung	0,6	84,7	12,9	97,7	2,3
Spanplatten	28,7	66,8	23,1	89,9	10,1
Masthähnchen	6,2	8,8	49,5	58,3	41,7
Legehennen	3,1	3,1	30,0	33,1	66,9

*) Die Mittelwerte wurden teilweise mit extrapolierten Messwerten bestimmt.

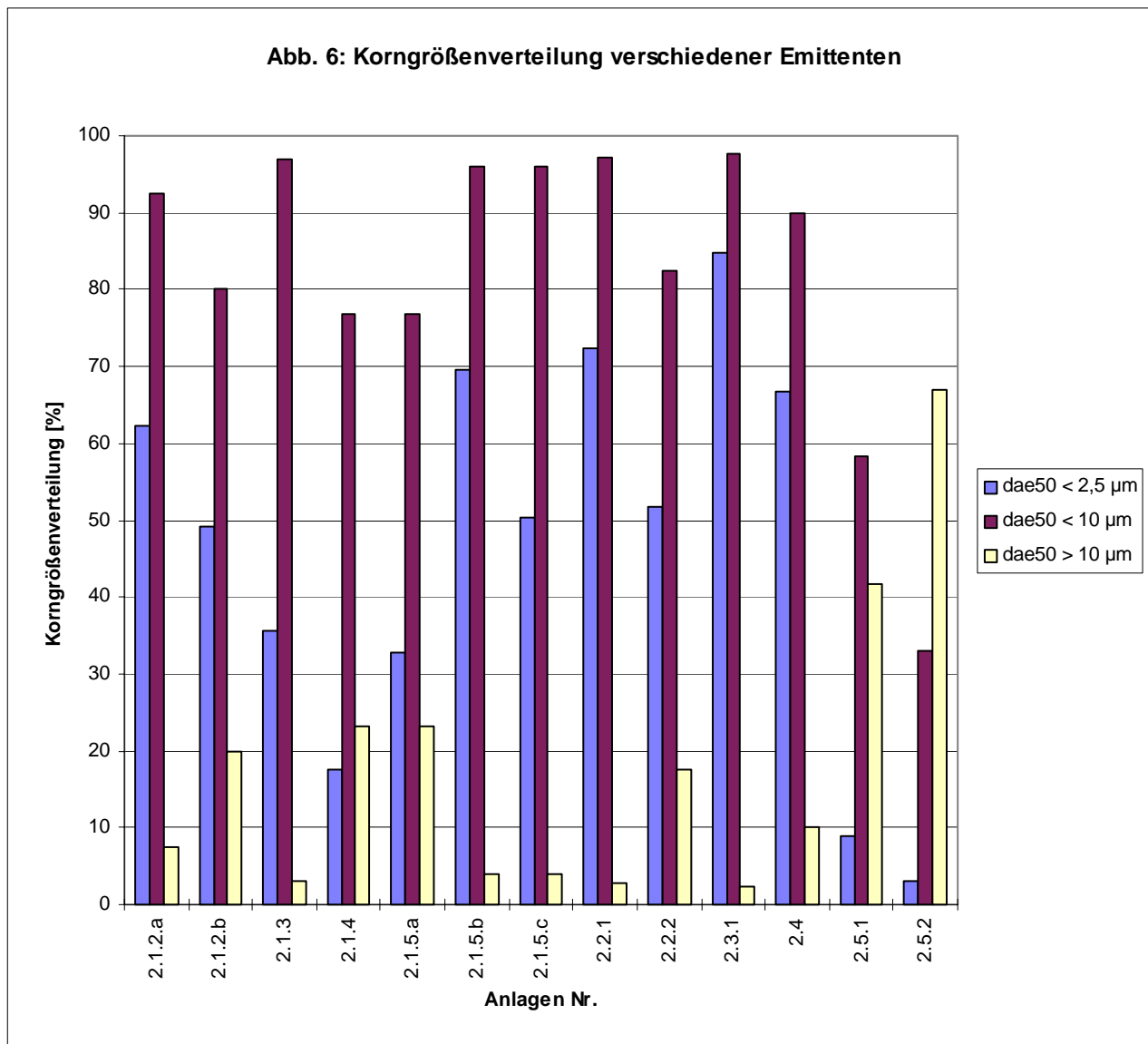
Entsprechend diesen Messwerten liegt der Anteil an Feinstaub < PM 10 bei ca. 80 %, der Anteil < PM 2,5 bei ca. 50 %.

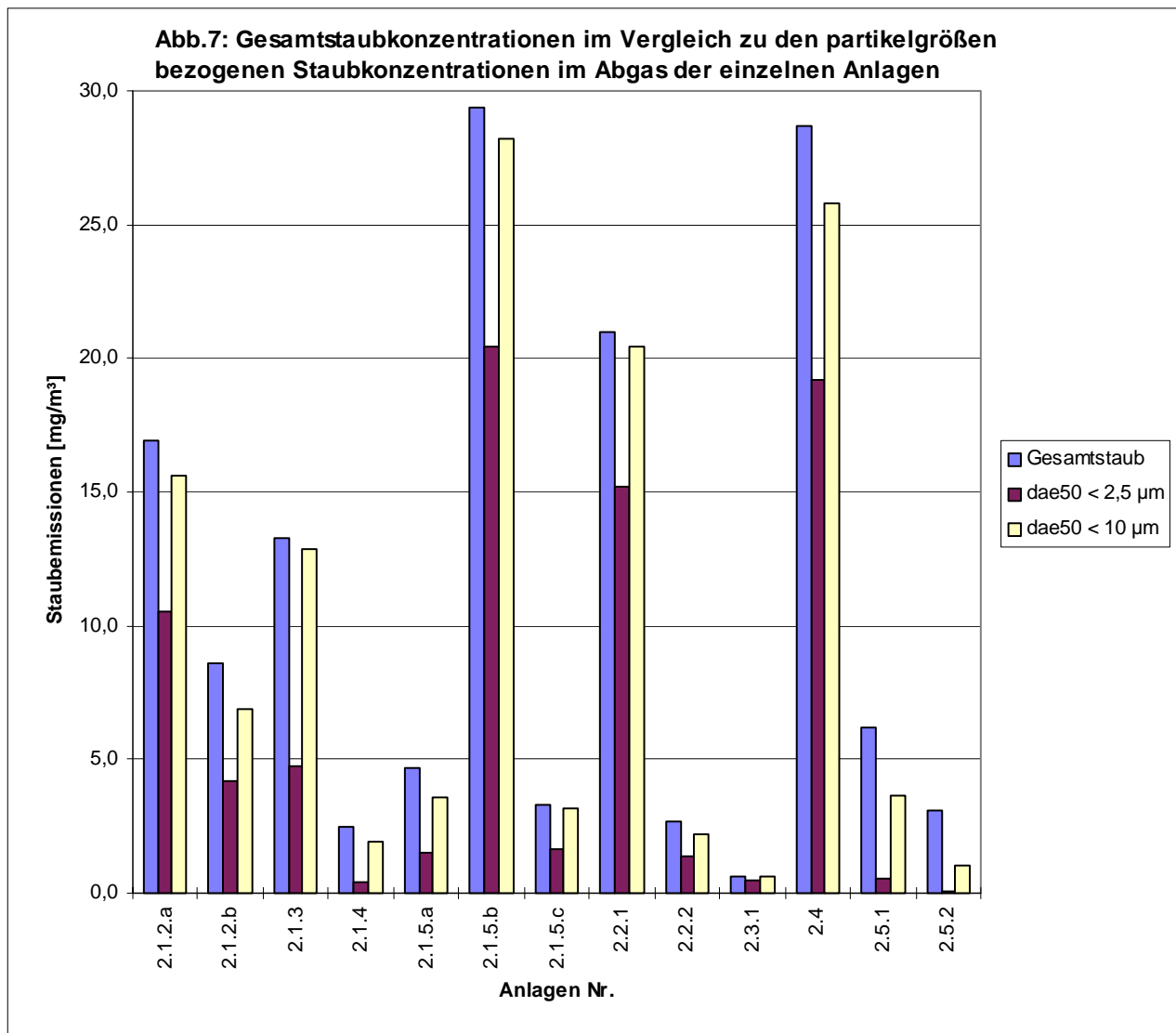
Gesamtstaub und absolute Korngrößenverteilung:

Anlagentyp	Gesamtstaub mg/m ³	d _{ae50} < 2,5 µm mg/m ³	2,5 µm ≤ d _{ae50} < 10 µm mg/m ³	d _{ae50} < 10 µm mg/m ³	d _{ae50} ≥ 10 µm mg/m ³ *)
Acrylnitrilfaser	16,9	10,5	5,1	15,6	1,3
Acrylnitrilfaser	8,6	4,2	2,7	6,9	1,7
Düngemittel	13,3	4,8	8,1	12,9	0,4
Bauchemie-Prod.	2,5	0,4	1,5	1,9	0,6
Bentonite	4,7	1,5	2,1	3,6	1,1
Bentonite	29,4	20,4	7,8	28,2	1,2
Bentonite	3,3	1,7	1,5	3,2	0,1
FCC-Anlage	21,0	15,2	5,3	20,4	0,6
FCC-Anlage	2,7	1,4	0,8	2,2	0,5
Spritzlackierung	0,6	0,5	0,1	0,59	0,01
Spanplatten	28,7	19,2	6,6	25,8	2,9
Masthähnchen	6,2	0,5	3,1	3,6	2,6
Legehennen	3,1	0,1	0,9	1,0	2,1

*) Die Mittelwerte wurden teilweise mit extrapolierten Messwerten bestimmt.

Abb. 6: Korngrößenverteilung verschiedener Emittenten





In der folgenden Tabelle sind die Korngrößenverteilungen entsprechend den Staubreinigungsverfahren zusammengestellt.

Anlagentyp	Gesamtstaub mg/m ³	d _{ae50} < 2,5 µm %	2,5 µm ≤ d _{ae50} < 10 µm %	d _{ae50} < 10 µm %	d _{ae50} ≥ 10 µm % *)
Elektrofilter					
Bentonite	29,4	69,5	26,5	96,0	4,0
Bentonite	3,3	50,3	45,7	96,0	4,0
FCC-Anlage	21,0	72,4	25,0	97,3	2,7
FCC-Anlage	2,7	51,8	30,6	82,4	17,6
Gewebefilter					
Bauchemie-Prod.	2,5	17,5	59,4	76,8	23,2
Bentonite	4,7	32,9	43,8	76,7	23,3
Spanplatten	28,7	66,8	23,1	89,9	10,1
Sonstige					
Acrylnitrilfaser	16,9	62,3	30,2	92,5	7,5
Acrylnitrilfaser	8,6	49,1	31,0	80,1	19,9
Düngemittel	13,3	35,7	61,2	96,9	3,1
Spritzlackierung	0,6	84,7	12,9	97,7	2,3
Masthähnchen	6,2	8,8	49,5	58,3	41,7
Legehennen	3,1	3,1	30,0	33,1	66,9

*) Die Mittelwerte wurden teilweise mit extrapolierten Messwerten bestimmt.

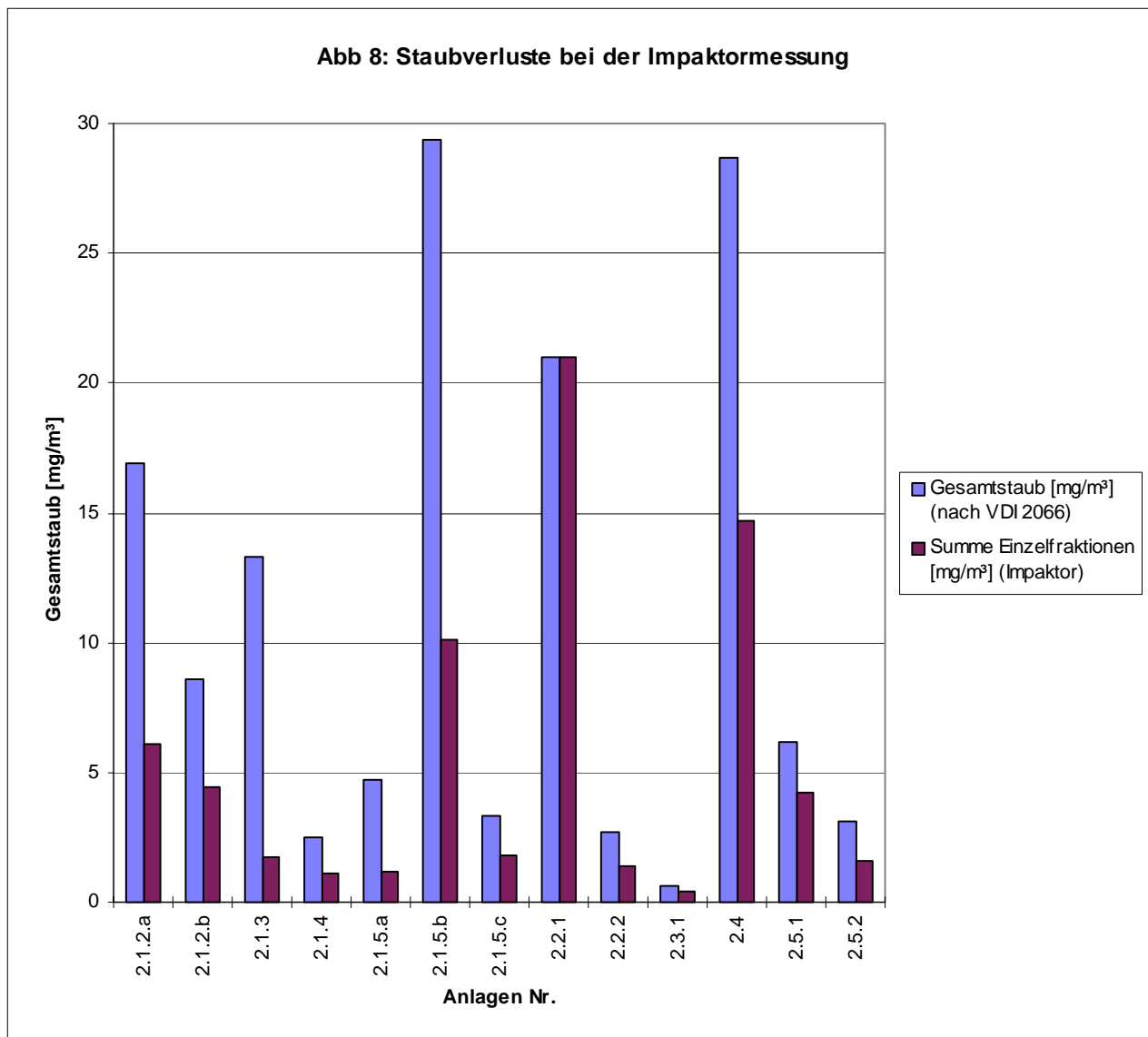
4.3 Bewertung der Messergebnisse - Staubverluste

Staubverluste, wie in Ziffer 3.2.2.3 beschrieben, sind nicht zu vermeiden. Erkennbar sind Verluste aus dem Vergleich der Gesamtstaubmessung mit der Summe der Impaktor Einzelfraktionen. Nachfolgende Tabelle und Grafik zeigt die genannten, unterschiedlichen Staubkonzentrationen für jede gemessene Anlage:

Gesamtstaub und Summe der Impaktor-Einzelfraktionen verschiedener Emittenten.

Anlagentyp	Gesamtstaub mg/m ³	Summe Einzel- fraktionen mg/m ³	Staubverluste %
Acrylnitrilfaser	16,9	6,1	64
Acrylnitrilfaser	8,6	4,4	49
Düngemittel	13,3	1,7	87
Bauchemie-Prod.	2,5	1,1	56
Bentonite	4,7	1,2	75
Bentonite	29,4	10,1	66
Bentonite	3,3	1,8	46
FCC-Anlage	21,0	21	0
FCC-Anlage	2,7	1,4	48
Spritzlackierung	0,6	0,4	33
Spanplatten	28,7	14,7	49
Masthähnchen	6,2	4,2	32
Legehennen	3,1	1,6	48

Abb 8: Staubverluste bei der Impaktormessung



Gegenüber den nach VDI 2066, Blatt 2 oder 7 gemessenen Gesamtstaubkonzentrationen sind die aus der Impaktormessung erhaltenen Gesamtstaubkonzentrationen (durch Aufaddition der Einzelfractionen 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 [14] wird der Verlust an Staub bei der Impaktormessung bestätigt. Allerdings sollen demnach diese Verluste vorzugsweise im Bereich $> 8 \mu\text{m}$, 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 [8] bei durchschnittlich höheren Staubkonzentrationen 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 [14] bezüglich der Korngrößenabhängigkeit der Verluste unter den heutigen Betriebsbedingungen noch quantitativ zutreffend sind. Aus diesem Grund wurden die Messwerte nicht mit diesen 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. Aus diesem Grund wurden bis auf die Messungen in den Anlagen 2.5.1 und 2.5.2 Quarzfaserfilter verwendet.

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

Die Repräsentativität der einzelnen Impaktormessungen innerhalb der Messreihe einer Anlage gibt die nachfolgende Tabelle wieder. Sie zeigt die Standardabweichungen der gemessenen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} -Fraktionen an den einzelnen Anlage.

Anlagentyp	$d_{ae50} < 2,5 \mu\text{m}$		$d_{ae50} < 10 \mu\text{m}$	
	Mittelwert %	Standardabweichung %	Mittelwert %	Standardabweichung %
Acrylnitrilfaser	62,3	12,8	95,4	4,6
Acrylnitrilfaser	49,1	7,5	80,1	7,6
Düngemittel	35,7	4,6	96,9	3,7
Bauchemie-Prod.	17,5	6,6	76,8	9,6
Bentonite	32,9	4,9	76,7	13,7
Bentonite	69,5	2,3	96,0	2,0
Bentonite	50,3	7,2	96,0	4,3
FCC-Anlage	72,4	4,8	97,3	1,4
FCC-Anlage	51,8	7,3	82,4	5,1
Spritzlackierung	84,7	5,4	97,7	1,6
Spanplatten	66,8	1,8	89,9	0,3
Masthähnchen	8,8	1,8	58,3	5,7
Legehennen	3,1	0,8	33,1	11,1

Im Messprojekt [7] zur Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten wurden teilweise Parallelbestimmungen durchgeführt. Diese ergaben eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse von 2 Parallelbestimmungen grafisch als Durchgangs-/ Rückstandssummenkurven dargestellt.

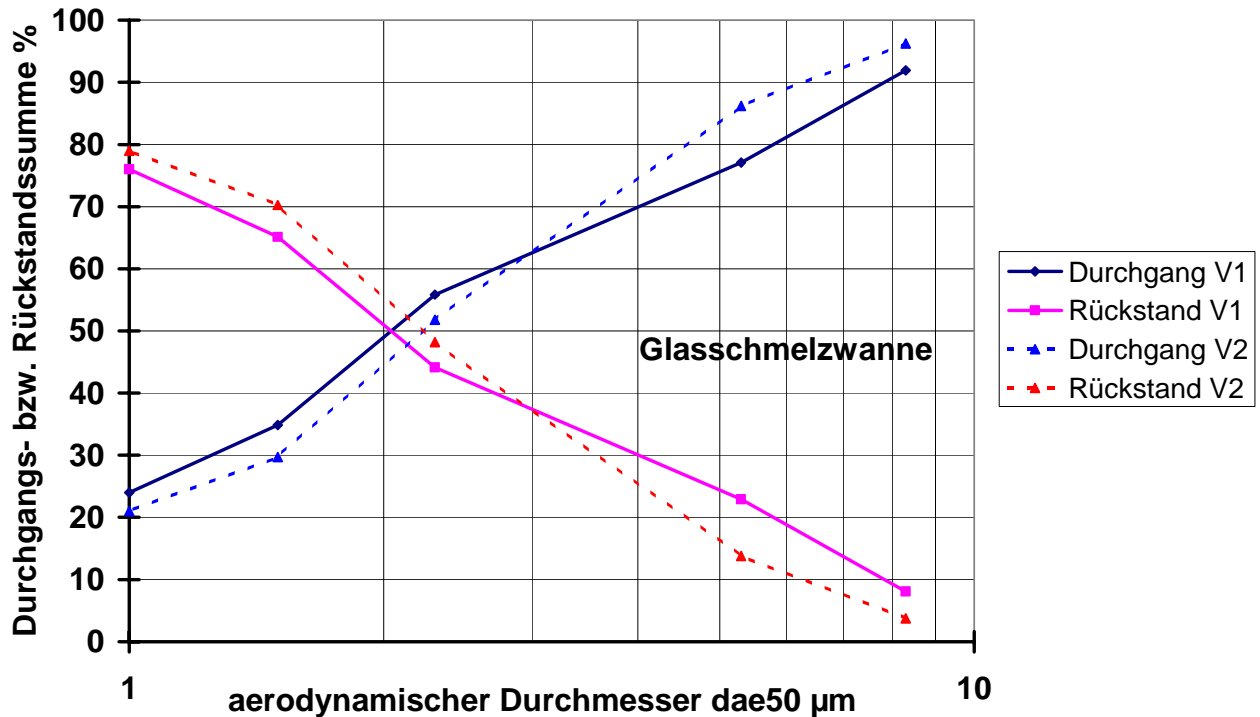


Abb. 4: Ergebnisse von Parallelbestimmungen an der Glasschmelzwanne (Behälterglasherstellung mit Elektrofilter)

4.4 Literatur

- [1] Lufthygienischer Jahresbericht 1999 des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, Schriftenreihe Heft 159.
- [2] MAK- und BAT-Werte-Liste 2000, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilung 36, Wiley-VCH.
- [3] Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft.
- [4] Jahresbericht 1999 des Umweltbundesamtes.
- [5] WaBoLu-Heft 2/00, Feinstaub - Die Situation in Deutschland nach der EU-Tochter-Richtlinie, Umweltbundesamt.
- [6] Schwebstaubbelastung in Baden-Württemberg, Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH, Karlsruhe, Mai 1998.
- [7] Grundsatzuntersuchung zur Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten (PM_{2,5} und PM₁₀): Zementindustrie, Feinkeramik, Glasindustrie, Aluminiumschmelzanlagen, Eisengießereien, Asphaltmischanlagen, Schwerölfeuerungen und Anlagen zur Herstellung von Silizium, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2000.
- [8] Stand der Immissionssituation bei Feinpartikeln (PM_{2,5} und PM₁₀) in Bayern, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2000.
- [9] VDI 2066, Blatt 1, Messen von Partikeln, Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Übersicht; 10/75
- [10] VDI 2066, Blatt 2, Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Filterkopfgeräte (4 m³/h, 12 m³/h); 08/93
- [11] VDI 2066, Blatt 3 Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Filterkopfgeräte (40 m³/h); 01/94
- [12] VDI 2066, Blatt 7, Messen von Partikeln, Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte; Planfilterkopfgeräte; 08/93
- [13] VDI 2066, Blatt 5, Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen; Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskaden-Impaktor; 11/94
- [14] UBA F&E 81-104 02 121; Erprobung von Emissionsmessverfahren zur Feststellung von Korngrößenfraktionen; Bericht des RW TÜV v. Okt. 1981
- [15] VDI 2448, Blatt 1, Planung von stichprobenartigen Emissionsmessungen an geführten Quellen; 04/92