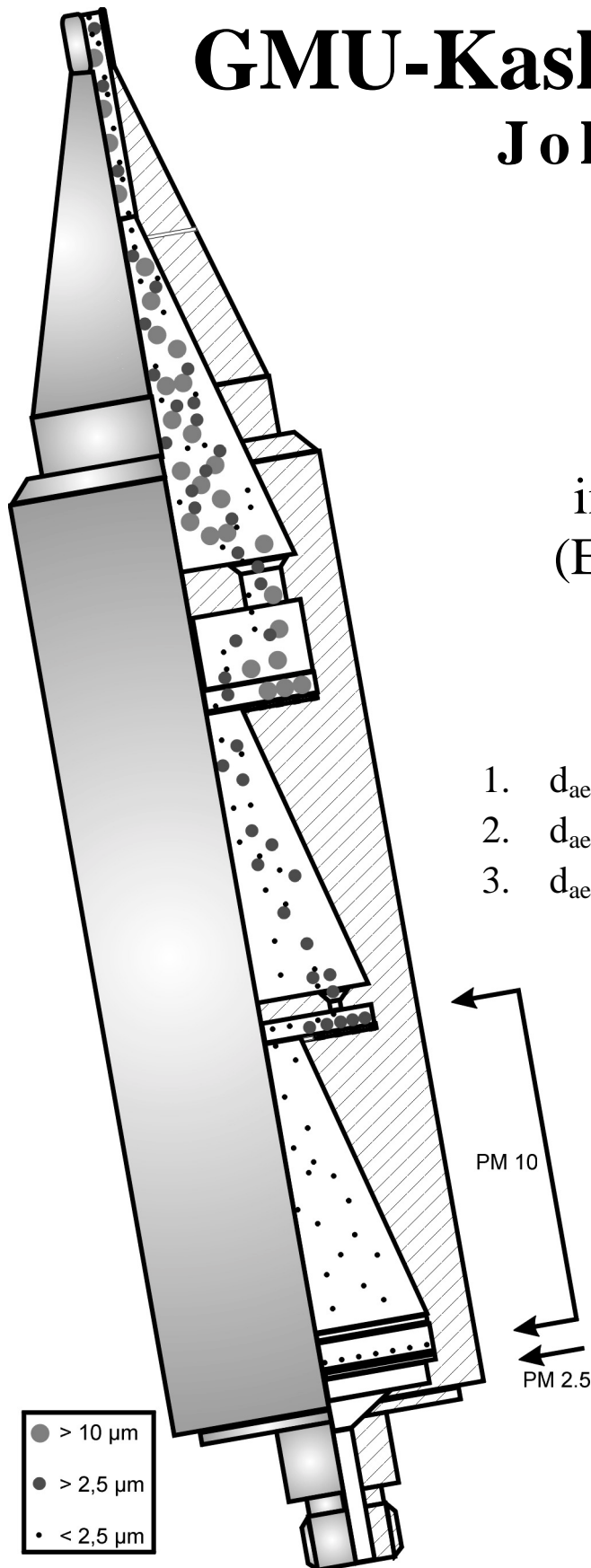


# GMU-Kaskadenimpaktor Johnas II

für die  
Messung von  
**PM 10 und 2,5**  
in strömenden Gasen  
(Emissionsmessungen)

### 3 cut-off-Fractionen:

1.  $d_{ae} > 10 \mu\text{m}$  (einatembare Partikel)
2.  $d_{ae} 2,5 \text{ bis } 10 \mu\text{m}$  (thorakale Partikel)
3.  $d_{ae} < 2,5 \mu\text{m}$  (alveolengängige Partikel)



- ☞ kalibriert mit mono- und polydispersen Partikeln
- ☞ an der ESA in Kassel (HLfU) auf Eignung geprüft

Eine Entwicklung der  
Gerhard-Mercator Universität Duisburg  
und des Landesumweltamts  
Nordrhein-Westfalen  
Hersteller: Paul Gothe Bochum

## **Bedienungsanleitung PM 10 / PM 2.5 - GMU-Kaskadenimpaktor Johnas II zur Messung der Emissionen von Feinstäuben**

Text und Daten als Auszug aus: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* (59 (1999), 11/12), A. C. John, T. A.J. Kuhlbusch, H. Fissan, (Gerhard Mercator Universität Duisburg, Prozeß- und Aerosolmeßtechnik) und G. Bröker, K.-J. Geueke (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen Essen) und aus *Abschlußbericht: Entwicklung des PM 10 / PM 2.5-Kaskadenimpaktors johnas II zur Messung der Emissionen von Feinstäuben* (Gerhard Mercator-Universität Duisburg, Prozeß- und Aerosolmeßtechnik Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. H. Fissan).

### **Der GMU - Kaskadenimpaktor Johnas II**

Aufgrund der neuen Immissionsstandards PM 10 und PM 2.5 besteht Bedarf, diese Partikelgrößenfraktionen auch bei Emissionsmessungen zu bestimmen, da Verbrennungs- und industrielle Prozesse anthropogene Quellen für atmosphärische Partikel dieser Größenfraktionen darstellen. Der Johnas II ist als ein Sammelsystem für PM 10 / PM 2.5 in-stack Messungen entwickelt und kalibriert worden. In diesem Kaskadenimpaktor wird das Abgas isokinetisch über die Probenahmesonden des Planfilterkopfgerätes nach VDI 2066 Bl. 7 angesaugt und das Aerosol in die Partikelgrößenfraktionen  $> 10 \mu\text{m}$ ,  $10 - 2.5 \mu\text{m}$  und  $< 2.5 \mu\text{m}$  aufgetrennt. Aufgrund eines relativ hohen Volumenstroms (je nach Betriebsbedingungen ca.  $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) können die Sammelzeiten niedrig gehalten werden und liegen bei Staubkonzentrationen von  $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  bei nur 30 min.

### **Development of a PM 10 / PM 2.5 cascade impactor for in-stack measurements**

#### **Abstract**

Due to the new standards of ambient air quality PM 10 and PM 2.5, these particle size fractions should also be measured in emissions as combustion and industrial processes are anthropogenic sources of particulate matter in ambient air. Therefore, the johnas a sampling system for PM 10 / PM 2.5 in-stack measurements was designed and calibrated. The exhaust gas is isokinetically sucked into the cascade impactor through the inlet of the plane filter device (VDI 2066 part 7) and the aerosol is fractionated in the particle size classes  $> 10 \mu\text{m}$ ,  $10 - 2.5 \mu\text{m}$  and  $< 2.5 \mu\text{m}$ . Due to a relatively high volume flow (ca.  $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ , depending on exhaust gas conditions), sampling times are kept short (for dust concentrations of  $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  only 30 min).

### **1 Einleitung**

Der Entwurf der Tochterrichtlinie "über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft" [1] zur Rahmenrichtlinie der EU zur Luftqualitätsüberwachung sieht anstatt der bislang durchgeführten Überwachung der Massenkonzentration des Gesamtschwebstaubes die Einführung neuer Immissions-Grenzwerte für die Schwebstaubfraktionen mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  (PM 10) und  $< 2.5 \mu\text{m}$  (PM 2.5) vor.

Anthropogene Quellen von Partikeln in der Außenluft sind neben dem indirekten Beitrag durch Emissionen gasförmiger Schadstoffe und Gas-zu-Partikel-Umwandlungen in der Atmosphäre die direkten Emissionen durch industrielle Prozesse sowie Verbrennungsvorgänge. Diese Emissionen können als Gesamtstaub nach verschiedenen Methoden, u.a. mit einem Planfilterkopfgerät nach VDI 2066 Bl. 7 [2] bestimmt werden. Zur Ermittlung der Massengrößenverteilungen dieser Partikelemissionen wurden Messungen im Kamin mit Kaskadenimpaktoren oder Kaskadenzyklonen durchgeführt [3], [4].

Infolge der durch Emissionsminderungsmaßnahmen inzwischen erreichten sehr geringen Gesamtstaubkonzentrationen waren die bislang erhältlichen Kaskadenimpaktoren oder -zyklone nur bedingt für die Bestimmung von PM 10 und PM 2.5 geeignet. Sie erfordern die Auswertung mehrerer Stufen. Durch die Partikelverteilung auf viele Stufen und einen Volumenstrom von ca.  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  werden für die Reingasmessungen häufig Sammelzeiten von mehr als 24 h benötigt, um wägbare Staubmassen zu erhalten.

Um praxisgerechtere Messungen zu ermöglichen wurde an der Gerhard-Mercator Universität Duisburg (GMU) in Zusammenarbeit mit dem Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA) ein neuer PM 10 / PM 2.5-Kaskadenimpaktor (GMU - Impaktor *johnas*) für in-stack Messungen ausgelegt, konstruiert und mit monodispersen sowie polydispersen Partikeln kalibriert.

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Auslegung des Impaktors wurde nach der Theorie von Marple [5, 6] durchgeführt. Danach läßt sich der Trenndurchmesser  $d(ae)_{50}$  einer Impaktorstufe berechnen mit:

$$d(ae)_{50} = \sqrt{\frac{9\pi Stk_{50}\eta d_j^3 N_i}{4C\rho_p \dot{V}}} \quad (1)$$

mit

Stokeszahl  $Stk_{50}=0.24$ ,  $\eta$ : dynamische Viskosität,  $d_j$ : Düsendurchmesser,  $N_i$ : Düsenanzahl,  $C$ : Slipkorrekturfaktor, Partikeleinheitsdichte  $\rho_p=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\dot{V}$ : Volumenstrom.

Neben den konstanten Größen Stokeszahl, Düsendurchmesser, Düsenanzahl und Einheitsdichte wird der Trenndurchmesser einer Impaktorstufe außer vom Volumenstrom noch von dynamischer Viskosität und Slipkorrektur bestimmt, die je nach Abgasbedingungen unterschiedliche Werte annehmen. Die dynamische Viskosität des Gasgemisches  $\eta$  ist einerseits abhängig von der Temperatur ( $T$ ), andererseits über die Einzelviskositäten  $\eta_i$  auch abhängig von der Abgaszusammensetzung[3]:

$$\eta(T) = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \eta_i(T) \sqrt{M_i T_{krit.,i}}}{\sum_{i=1}^n r_i \sqrt{M_i T_{krit.,i}}} \quad (2)$$

mit

$$\eta_i(T) = \eta_{i,0} \sqrt{\frac{T}{T_0} \frac{1 + S_i / T_0}{1 + S_i / T}} \quad (3)$$

mit

$r_i$ : Partialvolumen der Komponente  $i$ ,  $M_i$ : Molgewicht der Komponente  $i$ ,  $T_{krit.,i}$ : kritische Temperatur,  $T_0 = 273 \text{ K}$ ,  $S_i$ : Sutherlandkonstante.

Der Slipkorrekturfaktor  $C$  ist eine empirisch aufgestellte Funktion der Partikelgröße  $d(ae)_{50}$  sowie des Druckes  $p$ , der Temperatur  $T$  und über die dynamische Viskosität  $\eta$  auch der Abgaszusammensetzung [3]:

$$C = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d(ae)_{50}} \left[ 1,23 + 0,41 \exp\left(-0,88 \frac{d(ae)_{50}}{2 \cdot \lambda}\right) \right] \quad (4)$$

mit

$$\lambda = 2 \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}} \quad (5)$$

mit

$\lambda$ : mittlere freie Weglänge,  $M$ : Molgewicht,  $R$ : allgemeine Gaskonstante.

Zu den Randbedingungen, die bei der Impaktorauslegung [5, 6] berücksichtigt werden müssen, zählen hinsichtlich der Konstruktion die Verhältnisse zwischen Düsenlänge  $l$  und Düsendurchmesser  $d_j$  bzw.

Abstand Düse/Prallplatte  $s$  zu Düsendurchmesser  $d_j$ , die im Bereich von  $0,25 \leq s/d_j \leq 2,0$  bzw.  $0,5 \leq s/d_j \leq 5,0$  liegen sollen. Außerdem ist darauf zu achten, daß die Reynoldszahlen  $Re$  der Strömung in den Düsen der PM 10- sowie der PM 2.5-Stufe im Bereich von  $100 \leq Re \leq 3000$  liegen. Die Reynoldszahlen berechnen sich nach [3]:

$$Re = \frac{v \cdot d_j \cdot \rho}{\eta} \quad (6)$$

mit  
der Geschwindigkeit in den Düsen  $v$

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{N_i \cdot \pi \cdot d_j^2} \quad (7)$$

und  
der Dichte  $\rho$  des feuchten Gases im Betriebszustand [7]

$$\rho = \frac{\rho_0 + f}{1 + \frac{f}{\rho_{aq,0}}} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (8)$$

mit Index „0“ für Normzustand und

$f$  = Feuchtegehalt des Abgases [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],  $T_0 = 273 \text{ K}$ ,  $p_0 = 1013 \text{ mbar}$

und der Dichte des Gasgemisches  $\rho_0$  bei der Temperatur  $T_0$  und dem Druck  $p_0$ , die sich zusammensetzt aus den Anteilen  $r_{0,i}$  der Einzelgase mit den Dichten  $\rho_{0,i}$ :

$$\rho_0 = \sum_i r_{0,i} \cdot \rho_{0,i} \quad (9)$$

### 3 Auslegung und Design

Die Auslegung des PM 10 / PM 2.5-Kaskadenimpaktors basiert auf den oben genannten theoretischen Grundlagen sowie den Betriebsbedingungen, unter denen der Impaktor eingesetzt werden soll. Tabelle 1 faßt die mittleren Abgasdaten sowie die Extremwerte der Betriebsbedingungen zusammen, für die der Impaktor ausgelegt wurde. Die Auslegung gewährleistet, daß die für die Abscheidecharakteristiken wichtigen Reynoldszahlen (siehe (6)) für alle angenommenen Betriebszustände im von der Theorie geforderten Bereich von  $100 \leq Re \leq 3000$  liegen.

Die Konstruktion des GMU - Impaktors *johnas* (siehe Abbildung 1) erfolgte in enger Anlehnung an den Aufbau des zur Emissionsmessung von Gesamtstaub nach VDI 2066 Blatt 7 verwendeten Planfilterkopfgerätes. Zur isokinetischen Probenahme werden die Ansaugsonden des Planfilterkopfgerätes verwendet. Im gleichen Winkel schließt sich im Impaktor der Konus an, der die Strömung zur PM 10-Düsenplatte führt. Partikel  $> 10 \mu\text{m}$  werden auf der 1. Prallplatte abgeschieden und das restliche Aerosol gelangt zur PM 2.5-Düsenplatte. An die 2. Prallplatte zur Abscheidung der Partikel zwischen  $10 \mu\text{m}$  und  $2.5 \mu\text{m}$  schließt sich die Weiterführung zum Back-up Filter an, auf dem Partikel  $< 2.5 \mu\text{m}$  gesammelt werden. Die einzelnen Impaktorteile werden zusammengesteckt und mit dem Überwurf verschraubt. Abgedichtet wird der Impaktor mittels den Einzeldichtungen Di 8, 14, 15 und 45 und Teflonband, welches um das Überwurfgewinde gewickelt wird (siehe Abbildung 6). Der Auslaßkonus des Impaktors ist dann wiederum kompatibel mit dem Krümmer und den peripheren Geräten des Planfilterkopfes.

Foto 1 zeigt die einzelnen Bauteile des Impaktors. Der modulare Aufbau ermöglicht bei Bedarf auch erweiterte Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise als Einstufenimpaktor für PM 10 oder PM 2.5. Weiterhin lassen sich Stufen mit anderen Trenndurchmessern einfügen, z.B. eine zusätzliche PM 1-Stufe. Zur gravimetrischen Bestimmung der Staubbelastung werden die Filter, mit denen die beiden Prallplatten belegt sind, sowie der Back-up Filter vor und nach der Probenahme konditioniert und gewogen. Zur leichteren Handhabung und zur Verringerung der Fehler sind sowohl der Back-up Filter als auch die Filter der Prallplatten in Filterhaltern ("Filtertöpfchen") eingespannt, die vor Ort als Impaktormodule komplett gewechselt werden können. Um auch eine chemische Analytik der Inhaltsstoffe,

z.B. in Hinblick auf den Gehalt an Schwermetallen, zu ermöglichen, ist der Betrieb mit blindwertarmen Munktell Quarzfaserfiltern MK 360 vorgesehen, mit denen auch die Kalibrierung des Impaktors erfolgte. Um Kontaminationen im Hinblick auf die Schwermetallanalytik [8] zu vermeiden, wurde der Impaktor aus Titan gefertigt.

#### 4 Excel-Datei

Wie aus den oben aufgeführten Formeln (1) - (9) hervorgeht, sind die Trenndurchmesser  $d(ae)_{50}$  eines Impaktors von den Abgasbedingungen abhängig. Die Stufen PM 10 und PM 2.5 wurden daher für einen ganz bestimmten Betriebszustand (siehe Tabelle 1) ausgelegt. Damit sich diese Trenndurchmesser nicht verschieben, wenn sich die Abgasbedingungen, d.h. Temperatur und Druck im Kanal sowie Abgaszusammensetzung und Feuchtegehalt ändern, muß der durch den Impaktor geführte Volumenstrom entsprechend angepaßt werden [9]. Zur schnellen, exakten Berechnung wird die mitgelieferte Excel-Maske verwendet, in der die vor Ort gemessenen Abgasbedingungen eingegeben werden und der Volumenstrom berechnet wird, der für diese Bedingungen eingestellt werden muß, um die Trenndurchmesser 10  $\mu\text{m}$  und 2.5  $\mu\text{m}$  zu gewährleisten.

#### 5 Kalibrierung

Die beiden Impaktorstufen PM 10 und PM 2.5 wurden mit monodispersen Polystyrol-Latex- (PSL-) Partikeln (microparticles, Berlin; Duke Scientific, Palo Alto, Kalifornien, USA) kalibriert.

Die Partikelsuspensionen wurden in einem Generator zerstäubt und das erzeugte Aerosol vom Impaktor angesaugt. Zur Kalibrierung der PM 2.5-Stufe wurde die Partikelkonzentration vor und nach der Impaktorstufe mit dem PCS 2000 (Fa. Palas, Karlsruhe) meßtechnisch erfaßt. Für die PM 10-Stufe wurde aufgrund der dafür benötigten Partikelgrößen, die nur in niedrigeren Konzentrationen zur Verfügung standen, das Lasair Model 101 (Particle Measuring Systems Inc., Boulder Colorado, USA) eingesetzt.

Mit Hilfe des oben genannten Programms wurde der für die Kalibrierbedingungen benötigte Volumenstrom berechnet. Vor dem Einsatz des Impaktors erfolgte eine Dichtigkeitsüberprüfung, dann wurde der Volumenstrom eingestellt und auch während der Messungen wiederholt am Impaktoreinlaß überprüft. Die Kalibrierung der PM 10 und PM 2.5-Stufe wurde jeweils für Munktell MK 360 Quarzfaserfilter und für gefettete Prallplatten durchgeführt. Als Fett wurde medizinische Vaseline verwendet, die sich in Immissionsmessungen als gut geeignet erwies, Bouncing und Blow-off-Effekte zu reduzieren, die nachfolgende chemische Analytik aber nicht zu stören [10]. Diese Parallelmessungen dienen dazu, unerwünschte Effekte zu bestimmen, die nicht auf den Impaktor selbst, sondern das Material der Prallfläche zurückzuführen sind.

Die bei der Kalibrierung ermittelten Trenndurchmesser  $d(ae)_{50}$  liegen bei 2.53  $\mu\text{m}$  und 9.95  $\mu\text{m}$ . Die Abweichungen zu den berechneten Trenndurchmessern 2.5  $\mu\text{m}$  bzw. 10  $\mu\text{m}$  liegen bei +1.2 % bzw. - 0.5 % und somit sehr gut innerhalb der von der US EPA festgelegten Toleranzen von 2.5  $\mu\text{m} \pm 8\%$  bzw. 10  $\mu\text{m} \pm 5\%$  [11, 12]. Für die Abscheidekurven der PM 2.5-Impaktorstufe mit gefetteter Prallplatte und des US WINS-Impaktors (Abscheidekurve berechnet aus der "penetration efficiency curve" des WINS-Impaktors) ergibt sich eine gute Übereinstimmung (vgl. Abbildung 2). Während die Sammeleffizienz für die gefettete Prallplatte des Impaktors für Partikel  $< 2.5\ \mu\text{m}$  jedoch rasch abnimmt, werden mit Quarzfaserfiltern auch 1.5  $\mu\text{m}$  Partikel noch zu 9,3 % abgeschieden. Dieser Effekt erklärt sich durch Interzeption an der rauheren Oberfläche eines Filters im Vergleich zu einer glatten Prallplatte. Weiterhin ragen bei einer Filterfläche einzelne Fasern in den Aerosolstrom, und die Strömung kann, besonders bei höheren Geschwindigkeiten in den Düsen, in das Filtermaterial eindringen. Die ermittelten Kurven stehen in Einklang mit den Ergebnissen, die Rao und Whitby [13] für unterschiedliche Prallplattenmaterialien fanden.

Hinsichtlich der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $> 2.5\ \mu\text{m}$  ergeben sich für die unterschiedlichen Prallplattenbeschichtungen ebenfalls Unterschiede. Die Abscheidekurve für die gefettete Prallplatte des Impaktors erreicht bei 3.6  $\mu\text{m}$  95 % Abscheidung, bei 6,3  $\mu\text{m}$  mehr als 99 % und bleibt auch für 10  $\mu\text{m}$  große Partikel bei diesem Prozentsatz, wohingegen die Abscheidekurve für die Quarzfaserfilter bei ca. 3.1  $\mu\text{m}$  Partikelgröße abknickt und bis 10  $\mu\text{m}$  bei etwa 70 % bleibt. Diese Werte stehen in guter Übereinstimmung mit Ergebnissen von Rao [14], der für die Abscheidekurven mit Polystyrol-Latexpartikeln und Glasfaserfiltern ein Plateau bei 75 % fand, während die Werte für ölbeschichtete Prallplatten bei nahezu 100 % lagen.

Im Gegensatz zu Immissionsmessungen, bei denen üblicherweise gefettete Prallplatten eingesetzt werden, um Bouncing und Blow-off zu vermindern, ergeben sich für Emissionsmessungen Schwierigkeiten aufgrund der höheren Temperaturen. Zumindest für Prozesse mit niedrigen Abgastemperaturen ist aber zu überlegen, ob nicht eventuell gefettete Prallplatten verwendet werden können [15]. Weiterhin ist bei Vergleichen von Kalibrierkurven zu bedenken, daß der PM 2.5 / PM 10-Kaskadenimpaktor mit den extrem "springfreudigen" Latexpartikeln kalibriert wurde, während Kalibriermessungen anderer Impaktoren auch häufig mit flüssigen Partikeln (DOP-Partikel) durchgeführt wurden. Messungen mit dem Andersen Stack Sampler zeigten beispielsweise, daß die Abscheidegrade für Öltröpfchen für alle Stufen mit Ausnahme der ersten 100 % erreichten [16], wohingegen die Abscheidegrade bei festen Partikeln nach Durchlaufen eines Maximums zwischen 80 und 95 % wieder auf Werte unter 50 % abfielen [17].

Die erwähnten Effekte bezüglich der unterschiedlichen Abscheidekurven für Quarzfaserfilter und gefettete Prallplatten lassen sich auch bei der PM 10-Stufe beobachten (siehe Abbildung 3). Die zusätzliche Abscheidung an der Filteroberfläche für Partikel  $< 10 \mu\text{m}$  ist für die größeren aerodynamischen Partikeldurchmesser dieser Stufe jedoch weniger stark ausgeprägt. Während die Abscheidekurve bei  $15 \mu\text{m}$  für die gefettete Prallplatte gut mit derjenigen des US PM 10-Einlasses (Abscheidekurve berechnet aus der "effectiveness curve" des PM 10-Einlasses) übereinstimmt, beginnt die Kurve für die Quarzfaserfilter abzuknicken.

Beim Andersen Stack Sampler ergab sich für die Stufe mit einem Trenndurchmesser von etwa  $10 \mu\text{m}$  auch mit Öltröpfchen der Größen  $15 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$  nur eine etwa 80%ige Abscheidung, die zu größeren Partikeln hin wieder abfiel. Für einen Vorabscheider, der für diesen Impaktor entwickelt wurde, erreichte die Abscheidekurve für  $18 \mu\text{m}$  Partikel 100 % [18]. Diese Kalibrierung wurde allerdings nur mit flüssigen und nicht mit festen Partikeln durchgeführt.

Die Abscheidekurve des Impaktors wurde nur für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von maximal  $15 \mu\text{m}$  gemessen, da die zur Kalibrierung verwendeten PSL-Partikel mit größerem Durchmesser zu schnell sedimentierten und die Suspension mit dem Aerosolgenerator nicht mehr reproduzierbar zerstäubt werden konnte.

Alternativ wäre es möglich gewesen, Partikel mit einem bestimmten aerodynamischen Durchmesser mit einem höheren Volumenstrom durch den Impaktor zu saugen, um die Partikelgrößen dann mit Hilfe der charakteristischen Stokeszahl umzurechnen (siehe Gleichung (1)). Da jedoch fast der doppelte Volumenstrom erforderlich wäre, um mit einem  $15 \mu\text{m}$  Partikel ein  $20 \mu\text{m}$  großes Partikel zu "simulieren", wurde von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht. Da sich durch die starke Veränderung der Strömung auch Effekte wie Bounce-off nicht-quantifizierbar verändern, erscheint es nicht sinnvoll, die Abscheidekurven durch starke Erhöhung dieses Volumenstroms zu bestimmen.

## 6 Bestimmung der Partikelverluste an den Impaktorwänden

Versuche zum Partikelverlust an den Wänden des Impaktors wurden mit polydisperseren Aerosolen durchgeführt. Dazu wurde Tonerde-Pulver ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Fa. Goodfellow) mit einem laut Herstellerangaben mittleren Durchmesser von  $45 \mu\text{m}$  mit Hilfe eines Bürstengenerators zerstäubt und über ein Rohr entgegen der Strömung ausgerichtet dem Impaktor zugeführt. In Abbildung 4 sind die mit dem Impaktor bestimmten Fraktionen  $10 \mu\text{m} - 2.5 \mu\text{m}$  und  $< 2.5 \mu\text{m}$  dargestellt. Für die Verteilung "Verluste nicht berücksichtigt" wurden nur die Staubmassen auf den Filtern zur Berechnung der Größenverteilung herangezogen. Bei der Verteilung "Verluste berücksichtigt" wurden die Verluste an den Impaktorwänden der Staubmasse auf dem jeweils nachfolgenden Filter zugerechnet.

Zur Bestimmung der Verluste wurde der Impaktor in fünf Versuchen jeweils  $2 \times 10 \text{ min}$  mit dem Testaerosol beladen, wobei die Filter der Impaktorstufen nach den ersten 10 min um ca.  $15^\circ$  gedreht wurden, um Bouncing und Blow-off aufgrund von Überladung der Stufen zu vermeiden. Die Beladung des Impaktors betrug über alle Stufen durchschnittlich  $77,0 \text{ mg} \pm 28,5 \text{ mg}$ . Diese hohe Beladung war notwendig, um auch für die Bestimmung der Verluste an den Wänden wägbare Staubmassen zu erhalten. Die Quarzfaserfilter der Impaktorstufen bzw. der Back-up Filter wurden vor und nach der Probenahme gewogen. Der Impaktor wurde ausgepinselt und die Verluste, getrennt nach den einzelnen Bauteilen, ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Berechnet man jeweils aus den Abscheidungen an den Oberflächen und auf dem nachfolgenden Filter die Verhältnisse zwischen gesammelten Partikeln und Verlusten, so ergibt sich die in Abbildung 5 gezeigte Verteilung für die Stufen PM 10 - 2.5 und PM 2.5.

Für die Stufen PM 10 - 2.5 und PM 2.5 liegen die Verluste an den Wänden vor der jeweiligen Stufe bei  $3,6 \pm 0,5$  % bzw.  $1,7 \pm 0,3$  %. Diese Werte liegen niedriger als Angaben von Marple und Willeke [19], die Verluste an den Impaktorwänden mit durchschnittlich 5-10 % angeben. Bei der Stufe  $> 10$   $\mu\text{m}$  sind die Verluste mit  $76,1 \pm 5,2$  % wesentlich höher. Dabei traten jedoch bereits 90 % dieser Verluste an Ansaugsonde und Einlaufkonus auf. Da diese Bauteile identisch mit denen des Planfilterkopfes sind und beide Geräte mit etwa dem gleichen Volumenstrom betrieben werden, müßten die Verluste dort auch auftreten, so daß die fraktionierenden Messungen mit dem Kaskadenimpaktor vergleichbar sind mit den Gesamtstaubbestimmungen des Planfilterkopfgerätes.

Untersuchungen während der Kalibrierexperimente haben allerdings gezeigt, daß Verluste im Einlaß verstärkt bei nicht-isokinetischer Probenahme auftraten. Bei vorliegen von isokinetischer Absaugung ist die Abscheidung im Einlaßbereich des Impaktors weniger gravierend. Weiterhin sind die Partikelverluste Korngrößenabhängig. Weisen die gesammelten Abgaspartikel geringere durchschnittliche Korngrößen auf, so sind die Verluste ebenfalls als geringer anzunehmen. Franzen und Fißan [16] berichten für den Andersen Stack Sampler Gesamtverluste von etwa 4 % für 2  $\mu\text{m}$  Partikel, von knapp 20 % bei 5  $\mu\text{m}$ , etwa 35 % bei 10  $\mu\text{m}$  und von 80 % bei 20  $\mu\text{m}$ . Dabei fanden die Verluste im Partikelgrößenbereich  $> 10$   $\mu\text{m}$  zu mehr als 80 % vor den Stufen statt.

Vergleicht man die Werte der Partikelverluste miteinander, so lassen sich für eine genaue Korngrößenabhängige Bestimmung der Partikelabscheidung an den Wänden des PM 10 / PM 2.5-Kaskadenimpaktors ähnliche Daten erwarten, wie sie für den Andersen Stack Sampler bestimmt wurden.

Um die im Einlaß möglichen Verwirbelungen zu reduzieren, wurde mit verschiedenen konstruktiven Maßnahmen experimentiert. Sowohl ein, zwischen Konus und PM 10-Düsenplatte eingesetztes Distanzstück als auch ein Kegel auf der Düsenplatte zur Strömungsführung zeigten keine Verbesserung und würden durch die vergrößerte Oberfläche eher zu Partikelverlusten führen.

## 7 Schlußbemerkungen

Mit dem hier vorgestellten GMU - Impaktor *johnas* besitzen Sie ein Gerät, das in Hinblick auf die neuen Standards in der Immissionsmeßtechnik auch Emissionsstäube in den relevanten Größenklassen 10  $\mu\text{m}$  - 2.5  $\mu\text{m}$  sowie  $< 2.5$   $\mu\text{m}$  fraktioniert erfaßt. Der modulare Aufbau des Impaktors ermöglicht aber auch einen flexiblen Einsatz mit anderen Trenndurchmessern. Der Kaskadenimpaktor wurde im Labor experimentell untersucht und erwies sich als praktisch in der Handhabung. Der Einsatz erfolgt nun im halbtechnischen Maßstab sowie an Anlagen vor Ort.

## Literatur

1. Proposal for a Council directive relating to limit values for sulphur dioxide, oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air, European Union (1998).
2. VDI 2066 Blatt 7: Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen: Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte, Planfilterkopfgeräte. August 1993. Berlin: Beuth-Verlag.
3. VDI 2066 Blatt 5: Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor. November 1994. Berlin: Beuth-Verlag.
4. Lützke, K.; Muhr, W., Erprobung von Emissionsmeßverfahren zur Feststellung von Korngrößenfraktionen. RWTÜV e.V., Forschungsbericht 81-10402121, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 1981.
5. Marple, V.A., Liu, B.Y.H., Characteristics of laminar jet impactors, *Env. Sci. and Technology* **8** (1974) S. 648.
6. Rader, D., Marple, V., Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics, *Aerosol Science and Technology* **4** (1985) S. 141 - 156.
7. VDI 2066 Blatt 1: Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung - Übersicht. Oktober 1975. Berlin: Beuth-Verlag.
8. Schmeling, M.; Klockenkämper, R.; Klockow, D., Application of TXRF to the analysis of airborne particulate matter, *Spectrochim. Acta Part B* **52** (1997) S. 985-994.

9. John, A.C., Kuhlbusch, T.A.J., Fissan, H., Thermodynamic influences on size dependent measurements of ambient aerosols, *Journal of Environmental Monitoring*, accepted (1999).
10. Lawson, D.R., Impaction surface coatings intercomparison and measurements with cascade impactors, *Atmos. Env.* **14** (1980) S. 195-199.
11. U.S. EPA 1987, Revisions to the National Ambient Air Quality Standard for Particulate Matter, *Federal Register* 52 (July 1) 24634-24750.
12. U.S. EPA 1997, *Federal Register* 40 CFR Parts 50, 53, 58 (July 18).
13. Rao, A.K.; Whitby, K.T., Nonideal collection characteristics of single stage and cascade impactors, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **38** (1977) S. 174-179.
14. Rao, A.K.: An Experimental Study of Inertial Impactors. Ph.D. Thesis. University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota (1975).
15. Bürkholz, A., Einsatz von Kaskadenimpaktoren zur Staubmessung, Staub/Umwelt; Meßtechnik in der Luftreinhaltung (1987) S. ML12-ML22.
16. Franzen, H.; Fißan, H.J., Das Abscheideverhalten von Andersen non-viable und Andersen Stack Sampler bei Verwendung von Glasfaserprallplatten, *Staub - Reinhaltung der Luft* **39** (1979) S. 50-55.
17. Cushing, K.M. et al., Particulate sizing devices for control device evaluation. Report für EPA, Washington (1976) EPA-600/2-76-280.
18. Fißan, H.; Opiolka, S., Particle deposition in high capacity preseparators, *Part. Charact.* **2** (1985) S. 133-136.
19. Marple, V.A.; Willeke, K., Impactor design, *Atmos. Env.* **10** (1976) S. 891-896.
20. Din/ISO 7708: Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme. Januar 1996. Berlin: Beuth-Verlag.

## Bedienungsanleitung

Die Handhabung des Impaktors erfolgt prinzipiell wie diejenige des Planfilterkopfgerätes, der Impaktor wird auch mit denselben peripheren Geräten (Ansaugsonde zur isokinetischen Probenahme sowie Krümmer etc.) wie der Planfilterkopf betrieben.

### Reinigung

Die Reinigung des Impaktors erfolgt wie diejenige des Planfilterkopfes.

### Filter

Für den Betrieb des Impaktors sind Munktell Quarzfaserfilter MK 360, Ø 50 mm vorgesehen.

### Back-up Filter

Der ausgeheizte Quarzfaserfilter wird wie gewohnt in den Filterhalter (I) eingelegt und mit dem Sprengring (1) fixiert.

### Filter der PM 10- und PM 2.5-Stufe

Die ausgeheizten Quarzfaserfilter werden mit Hilfe des mitgelieferten Werkzeugs ausgestanzt, in die Filterhalter (D und G) eingelegt und mit den Sprengringen fixiert.

### Wägung

Erfolgt die Wägung der Filter vor bzw. nach der Probenahme mitsamt der Filterhalter, so können Verfälschungen des Meßergebnisses, die beispielsweise durch Verluste an Staubmasse aufgrund der Entnahme des Filters aus dem Filterhalter entstehen, vermieden werden. Die Wägung erfolgt nach Akklimatisierung der Filter unter konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit einer möglichst hoch auflösenden Waage.

### Zusammenbau

Die einzelnen Teile (siehe Abbildung 1) gemäß der Reihenfolge zusammenbauen. Dichtung Di 14 unter und Di 15 über den Planfilterhalter verwenden (siehe Abbildung 6). Diese Dichtungen sind sehr wichtig. Die Dichtung Di 45 wird über den Einlaufkonus gesetzt und dichtet den Überwurf nach oben hin ab. Das Gewinde des Überwurfs kann nach Bedarf mit Teflonband abgedichtet werden.

Konus	(B)
PM 10-Düsenplatte	(C)
PM 10-Prallplatte	(E)
mit Filterhalter und Sprengring	(D + d)
PM 2.5-Düsenplatte	(F)
PM 2.5-Prallplatte	(H)
mit Filterhalter und Sprengring	(G + g)
Back-up Filterhalter und Sprengring	(I + i)
Auslaß	(J)
zusammenzubauen und mit dem Überwurf	(K)

zu verschrauben.

Gemäß Abbildung 6 werden die Dichtungen eingesetzt.

### Betrieb

Mit Hilfe des mitgelieferten Excel-Programms, in das die Betriebsdaten wie Abgastemperatur, -zusammensetzung etc. eingegeben werden, wird die auszuwählende Ansaugsonde zur isokinetischen Probenahme sowie der Volumenstrom, mit dem der Impaktor für die entsprechenden Bedingungen zu betreiben ist, ermittelt.

## Allgemeine Hinweise zur Probenahme mit dem Impaktor Johnas

### Vorbemerkung

In der Richtlinie VDI 3491 Bl. 1 werden 19 verschiedene Partikeldurchmesser definiert. In Verbindung mit verschiedenen Mengenmaßen, z.B. Anzahl, Volumen und Masse, ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der Messung und Darstellung einer Partikelgrößenverteilung. Bei Emissionsmessungen bietet sich zur Beschreibung der Partikelgröße der aerodynamische Durchmesser an. Er beschreibt für Partikeln im Bereich über 0,5 µm Durchmesser das Verhältnis der Partikel im gasgetragenen Zustand. Im Sinne der TA Luft sollten zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung Massenanteile herangezogen werden.

Entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Aufgabenstellung ist die Anzahl der einzusetzen Messverfahren eingeschränkt. Es ist anzustreben, die Partikelgröße unmittelbar im gasgetragenen Zustand zu messen. Für die meisten zu diesem Zweck verwendeten Messgeräte, wie z.B. Streulichtmessgeräte, Diffusionsbatterien, elektrostatische Aerosolanalysatoren und Aerosolzentrifugen, ist eine Probenahme über eine Entnahmesonde notwendig, da die Geräte nicht unmittelbar im Abgaskanal eingesetzt werden.

Es hat sich gezeigt, dass für Partikeln über 3 µm große Erfassungsverluste durch Anlagerung eines Teils der Stäube an den Wandungen von Sonde und Messgeräteeinlass auftreten. Der Anwendungsbereich dieser Messverfahren beschränkt sich daher auf Partikeln unter 3 µm. Bei Emissionsmessungen an gewerblichen industriellen Anlagen sind Partikeln im Bereich kleiner als 1 µm bis 100 µm zu erwarten.

Die vorgenannten Aerosolmessgeräte können in heißen und chemisch aggressiven Abgasen in der Regel nicht verwendet werden. Eine starke Abkühlung des entnommenen Teilstromes verbietet sich, da die Kondensation von Feuchtigkeit und Abgasbegleitstoffen das Größenspektrum der Partikeln verändern kann.

Nach dem heutigen Stand der Messtechnik eignet sich der Kaskadenimpaktor Johnas für eine Teilstromentnahme im Sinne der Richtlinie VDI 2066 Bl. 1 und gleichzeitige Trennung in Fraktionen. Er kann außerdem in heißen, chemisch aggressiven Gasen unmittelbar eingesetzt werden.

Bei Messungen mit dem Johnas in Verbindung mit gravimetrischer Auswertung ergeben sich Massenverteilungen hinsichtlich des aerodynamischen Durchmessers der Partikeln. Dieses Verfahren ersetzt jedoch nicht die Messung des Gesamtstaubgehaltes im Sinne der Richtlinie VDI 2066 Bl. 2.

Umrechnungen, in andere Partikelgrößenmaße sind nur in Ausnahmefällen und mit Hilfe zusätzlicher Informationen über weitere Eigenschaften, wie z.B. Dichte und Formfaktoren der Staubpartikeln, möglich.

Wie bei allen Aerosolmessgeräten sind der Anwendbarkeit des Johnas Grenzen gesetzt. Dies gilt für den Partikelgrößenbereich, die Feststoffkonzentration und die Eigenschaften des Trägergases (siehe Tab. 1).

Grundsätzlich ist der Einsatz des Johnas nicht auf den in dieser Anleitung beschriebenen Anwendungsbereich beschränkt. Der Impaktor kann z.B. auch zur Messung auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik eingesetzt werden.

### 1 Grundlage des Verfahrens

Zur Gewinnung partikelgrößenabhängiger Staubfraktionen wird beim Johnas die unterschiedliche Trägheit von Partikeln ausgenutzt. Eine Impaktorstufe besteht prinzipiell aus den Elementen Düse und Prallplatte. Partikeln mit ausreichender Trägheit des in der Düse beschleunigten Partikelkollektivs treffen auf die Prallplatte auf und werden dort gesammelt.

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

Der Kaskadenimpaktor besteht aus hintereinandergeschalteten Impaktorstufen, die so ausgelegt sind, dass in den nachfolgenden Stufen Partikeln geringerer Trägheit abgeschieden und somit Fraktionen unterschiedlicher Partikelgröße erhalten werden. Die nicht abgeschiedenen Partikeln werden auf einem hinter den Stufen angeordneten Endfilter gesammelt.

Zur Angabe des in den Fraktionen erfassten Partikelgrößenbereiches werden die Abscheidewirkungsgrade in Abhängigkeit von Partikelgrößenmaßen für die einzelnen Impaktorstufen eines Kaskadenimpaktors benötigt. Die Wahrscheinlichkeit, mit der Partikeln bestimmter Größe auf der Prallplatte impaktieren und dort haften bleiben, wird durch den Abscheidewirkungsgrad charakterisiert, der sich aus dem Produkt des Impaktions- und Haftwirkungsgrades ergibt.

Nur unter der Voraussetzung, daß der Haftwirkungsgrad 100% beträgt, ist der Abscheidewirkungsgrad gleich dem Impaktionswirkungsgrad. Der Impaktionswirkungsgrad ist vom Strömungsfeld und insbesondere von der Beweglichkeit der Partikeln abhängig. Das Strömungsfeld wird im wesentlichen durch das Verhältnis  $S/D$  und die Reynolds-Zahl charakterisiert. Die Reynolds-Zahl ist definiert als

$$Re = \frac{u \cdot D \cdot \delta}{\mu}$$

- $u$  mittlere Gasgeschwindigkeit im Düsenaustrittsquerschnitt
- $D$  Durchmesser
- $\delta$  Dichte des Gases
- $\mu$  dynamische Viskosität des Gases.

V.A. Marple und B.Y.H. Liu [5] haben die Impaktionswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Stokes-Zahl für unterschiedliche Strömungsfelder berechnet. Nach diesen Berechnungen ist bei dem Johnas der Impaktionswirkungsgrad für  $L/D > 0,25$ ,  $0,5 < S/D < 5,0$  und  $100 \leq Re \leq 3000$  in guter Näherung von der Stokes-Zahl allein abhängig. Er steigt bis auf einen Wert von etwa 80 % sehr steil über der Stokes-Zahl an und erreicht mit geringer werdender Steigung schließlich den Wert 100%. Wegen des starken Anstiegs des Impaktionswirkungsgrades über der Stokes-Zahl kann der Verlauf des funktionalen Zusammenhanges annähernd als Sprungfunktion dargestellt werden, wobei die Sprungstelle dem Medianwert  $St_{50}$ , zugeordnet wird.

Bei der praktischen Auswertung von Impaktormessungen wird von experimentell ermittelten Medianwerten der Stokes-Zahl ausgegangen und der Grenzpartikeldurchmesser  $D_{ae50}$  einer Impaktorstufe bestimmt.

Der Einfluss der Reynolds-Zahl auf den Medianwert  $St_{50}$  kann im Bereich  $100 \leq Re \leq 3000$  vernachlässigt werden.

## 2 Funktionsweise und Bauelemente des Johnas

### 2.1 Funktionsweise

Ein staubbeladener Gasstrom strömt durch eine *Entnahmesonde* und durch ein *Übergangsteil* in den eigentlichen Impaktor. In den einzelnen *Impaktorstufen* erfolgt die Trennung der Staubpartikeln nach ihrer Größe. Die dabei nicht niedergeschlagenen Partikeln werden auf einem *Endfilter* zurückgehalten.

Um bei Impaktormessungen ausreichende Staubmassen zu erhalten, ist ein entsprechender Volumenstrom durch den Impaktor erforderlich. Unter Beachtung des vorgegebenen Bereiches der Reynolds Zahlen wurden beim Johnas in einer Impaktorstufe mehrere gleichartige Düsen parallel angeordnet.

Der Johnas muss entsprechend seiner Auslegung in bestimmten Grenzen hinsichtlich des Volumenstromes betrieben werden. Dabei ist die Forderung nach geschwindigkeitsgleicher Teilstromentnahme zu beachten.

## 2.2 Bauelemente

Der Kaskadenimpaktor besteht aus folgenden Teilen:

Entnahmesonde

Zur Anpassung der Gaseintrittsgeschwindigkeit in die Entnahmesonde an die Gasgeschwindigkeit im Abgaskanal ist ein auswechselbarer Satz von Sonden mit unterschiedlichen Durchmessern notwendig.

Einlaufkonus

Dieses dient dem Übergang vom Durchmesser der Entnahmesonde auf den Durchmesser der ersten Düsenplatte.

Impaktorgehäuse

Es dient der Aufnahme der Impaktoreinsätze, die aus den einzelnen Impaktorstufen, den Dichteleme-nten sowie dem Endfilter bestehen.

Impaktorstufen

Diese bestehen aus *Düsenplatten und Prallplatten*.

Entsprechend den Eigenschaften der zu untersuchenden Partikeln, der Gaszusammensetzung und der Gastemperatur sowie den Anforderungen der nachfolgenden Analyse werden die Prallplatten, die gleichzeitig die Filterhalter sind, mit geeigneten Materialien belegt (Munktell-Filter) oder beschichtet (Haftmittel).

Endfilter

Dieses Filter folgt unmittelbar der letzten Impaktorstufe und sammelt die nicht abgeschiedenen Partikeln. Es werden Schwebstofffilter der Klasse S verwendet.

## 3 Messanordnung

Der Aufbau der Messanordnung muss der jeweiligen Messaufgabe entsprechen. Im folgenden wird eine typische Anordnung für eine Impaktormessung beschrieben, die sich an die Richtlinie VDI 2066 Bl. 1 anlehnt.

### 3.1 Geräte und Betriebsmittel

#### 3.1.1 Geräte zur Probenahme

Alle gasführenden Teile sind aus korrosionsbeständigem Titan gefertigt.

<i>Entnahmesonden</i>	Wirkdurchmesser 3 bis ca. 16 mm; gerade Sondenausführung
<i>Kaskadenimpaktor</i>	bestehend aus Impaktorgehäuse und Impaktoreinsatz.

#### 3.1.2 Geräte zum Fördern, Einstellen und Messen des Teitvolumenstromes

<i>Gastrockenturm</i>	Silikagelfüllung; Mindestdurchmesser des Turms 70mm, Höhe der Fül- lung ca. 300 mm
<i>Kondensatabscheider</i> <i>Absaugeaggregat</i>	falls erforderlich, wird dem Trockenturm ein Gaskühler vorgeschaltet z.B. korrosionsbeständige Förderpumpe, Volumenstrom ca. 4 m <sup>3</sup> /h bei 400 mbar saugseitig

<i>Absaugerohr</i>	Innendurchmesser ca. 8 mm, Außendurchmesser bei Längen über 2 m mindestens 20 mm; um ein Zurückfließen von Kondensat in den Kaskadenimpaktor zu vermeiden, ist ggf. eine Heizung des Absaugerohres oder der Einbau einer Kondensatfalle vorzusehen.
<i>Gasvolumenmessgerät</i>	Gasvolumenzähler zum Messen des durchgesetzten Gasvolumens, Nennbelastbarkeit 6 m <sup>3</sup> /h, Eichfehlergrenze 2%, zulässiger Unterdruck gegen Atmosphäre 200 mbar
<i>Schwebekörper</i>	zur Kontrolle des Teilvolumenstromes
<i>Temperaturmessgeräte</i>	zum Messen der Gastemperatur am Gasvolumenzähler und der Abgastemperatur an der Entnahmestelle
<i>Differenzdruckmessgerät</i>	zum Messen des Differenzdruckes am Gasvolumenzähler und im Abgaskanal gegen den atmosphärischen Luftdruck
<i>Zeitmessgerät</i>	zum Messen der Probenahmedauer
<i>Barometer</i>	zum Messen des atmosphärischen Luftdruckes am Messort

Der Wirkdruck kann z.B. mit einer Prandtl-Sonde in Verbindung mit einem Mikromanometer gemessen werden. Die Dichte muss aus Druck, Temperatur, (Gaszusammensetzung und den molaren Massen der Gaskomponenten) berechnet werden.

Zur Auswertung die beigefügte Excel-Datei verwenden.

### 3.1.3 Zubehör für die Vor- und Nachbehandlung der Sammelplatten im Labor

<i>Waage</i>	Auflösungsvermögen mindestens 0,1 mg; Aufstellung möglichst in einem temperatur- und feuchte konstanten Raum (Empfehlung: Temperatur ca. 20°C, rel. Feuchte konstant im Bereich 50 bis 60%)
<i>Trockenschrank</i>	zum Ausheizen der Sammelplatten auf ca. 250°C
<i>Glühofen</i>	nur erforderlich für den Fall höherer Einsatztemperaturen (über 250°C)
<i>Exsikkator</i>	zum Äquilibrieren der Proben
<i>Transportbehälter</i>	für die Aufnahme der Impaktoreinsätze bzw. Impaktorstufen

### 3.1.4 Betriebsmittel

<i>Sammelplatten</i>	mit Munktell Filter
<i>Endfilter</i>	zur Aufnahme der nicht abgeschiedenen Partikeln
<i>Haftmittel</i>	zum Verbessern der Haftung der Staubpartikeln auf Sammelplatten aus Hochvakuumfett Apiezon L oder Apiezon H
<i>Trocknungsmittel</i>	Silikagel mit Farbindikator

## 3.2 Aufbau der Messanordnung

Der prinzipielle Aufbau der Messanordnung ist entsprechend der Einrichtung des Messplatzes für Staubmessungen nach Richtlinie VDI 2066 Bl. 1 vorzunehmen.

Der Kaskadenimpaktor ist mit einer geraden Einlaufsonde nach VDI 2066 Bl. 7 zu bestücken und entgegen der Strömungsrichtung im Abgaskanal einzusetzen.

Abweichend von der dargestellten Messanordnung kann es in Sonderfällen, wie z.B. bei übersättigten Abgasen, notwendig werden, den Kaskadenimpaktor außerhalb des Abgaskanals anzuordnen. Dabei sind dem Impaktor ein Absaugerohr, ein Krümmer sowie die Entnahmesonde vorgeschaltet. Diese sind ggf. zu beheizen. Bei dieser Anordnung können sich im Entnahmesystem Partikeln an den Wänden ablagern und dadurch der fraktionierenden Abscheidung im Impaktor verloren gehen.

## 4 Vorbereiten und Durchführen der Messung

### 4.1 Auswahl und Vorbehandeln der Sammelplatten und des Endfilters

Für jede Messung müssen ein geeigneter Satz Sammelplatten und ein Endfilter ausgewählt und vorbehandelt werden.

Sammelplatten (Filterhalter) und Endfilter bestehen aus Titan, die in der Regel inert gegenüber den Bestandteilen des Teilgasstromes sind, damit bei der Messung keine Massenänderungen infolge chemischer Reaktionen auftreten.

Die Sammelplatten mit den Filtern aus Quarzfaser werden einzeln in Schälchen aus Aluminiumfolie gelegt und in einem Trockenofen mindestens 1 h bei einer Temperatur von 180°C ausgeheizt. Soll der Kaskadenimpaktor bei höheren Temperaturen als 180°C eingesetzt werden, ist darauf zu achten, dass Sammelplatten und Endfilter bei entsprechend höherer Temperatur vor- und nachbehandelt werden, um z.B. einen möglichen Bindemittelschwund bei den Messungen zu vermeiden. Nach der Wärmebehandlung müssen sie mit den Aluminiumschälchen vor dem Wiegen mindestens 1 h im Exsikkator abgekühlt werden. Nach der Wägung sind sie vor Staub geschützt in Petrischalen aufzubewahren. Die Aluminiumschälchen, in denen Sammelplatten und Endfilter während der gesamten Vorbehandlung und auch nach der Messung zur Nachbehandlung verbleiben, lassen sich aus Aluminiumfolie, wie sie im Haushalt verwendet wird, anfertigen.

Die vorgewogenen Sammelplatten und Endfilter können am Messort in den Impaktor eingelegt werden. Der Transport der vorbereiteten Sammelplatten und Endfilter zum Einsatzort und der belegten Sammelplatten und Endfilter ins Labor hat mit besonderer Sorgfalt zu erfolgen.

Die einzelnen Sammelplatten und Endfilter müssen eindeutig identifizierbar sein. Da sie selbst nicht gekennzeichnet werden dürfen (Gewichtsänderung), empfiehlt es sich, die Wiegeschalen mit der Satznummer und der Stufennummer zu kennzeichnen. Beim Ein- und Auslegen ist dann auf strikte Einhaltung der Reihenfolge zu achten.

### 4.2 Vorbehandeln der Impaktoreinsätze

Die Einzelteile des Impaktoreinsatzes sind vor jeder Messung im Ultraschallbad zu reinigen. Als Reinigungsmittel genügt im allgemeinen Leitungswasser, dem etwas Spülmittel zugegeben wird, oder Alkohol. Bei Verwendung von Leitungswasser ist gründliches Nachspülen mit destilliertem Wasser zur Vermeidung von Kalkablagerungen notwendig.

Düsenplatten, Sammelplatten (Filterhalter) und Dichtungen sind nach dem Trocknen visuell auf grobe Beschädigungen zu kontrollieren. Beim Zusammenbau ist darauf zu achten, dass Dichtungen, Sammelplatten und Endfilter nicht beschädigt werden.

### 4.3 Durchführen der Messung

#### 4.3.1 Messplanung

Vor der Messung ist eine Messplanung entsprechend Richtlinie VDI 2066 Bl. 1 durchzuführen. Dazu gehört die Festlegung der Anzahl und der Anordnung der Messpunkte. Im Gegensatz zur Gesamtstaubmessung mit einer Filterkopfsonde ist bei einer Impaktormessung der Gasdurchsatz nach Festlegen des Sondendurchmessers nicht mehr frei wählbar, sondern muss während einer Messung (Probenahme) konstant gehalten werden. Es können daher nur Punkte mit annähernd gleicher Geschwindigkeit (Abweichungen von  $\pm 30\%$  sind zulässig) in einer einzelnen Messung erfasst werden. Daraus folgt, dass bei starken Unterschieden in der Geschwindigkeitsverteilung eine Netzmessung nicht mit einem einzigen Messvorgang durchgeführt werden kann.

Wenn zu erwarten ist, dass der Massenanteil an Partikeln mit Durchmessern über 10  $\mu\text{m}$  mehr als ca. 15% beträgt, muss ggf. die Probenahmedauer entsprechend kurz gewählt werden, um eine Überladung der ersten Sammelplatte zu vermeiden. Staubgehalte im Abgas von mehr als 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  sind ein Hinweis auf nennenswerte Anteile an Partikeln mit Durchmessern über 10  $\mu\text{m}$ .

### 4.3.2 Abgasdaten

Um angenähert geschwindigkeitsgleiche Absaugbedingungen einzustellen zu können, ist es notwendig, die Abgasgeschwindigkeit an den vorgesehenen Messpunkten zu bestimmen. Diese lässt sich mit Staurohren von Gothe ermitteln.

### 4.3.3 Handhabung des Kaskadenimpaktors im Betrieb

Die Staubmessung mittels Impaktor erfolgt in ähnlicher Weise wie mit einem Filterkopfgerät. Nachfolgend sind die einzelnen Arbeitsgänge dargestellt.

Beim Einführen des Impaktor-Entnahmesystems in den Abgaskanal ist darauf zu achten, dass der an der Kanalwandung haftende oder abgelagerte Staub nicht in die Sonde gelangt. Ferner muss vermieden werden, dass die Druckdifferenz zwischen Abgaskanal und Umgebung eine Strömung durch den Impaktor verursacht. Das Absperrventil ist zu diesem Zweck dicht geschlossen zu halten und erst nach Inbetriebnahme des Absaugeaggregats zu öffnen.

Vor Beginn des Absaugens empfiehlt es sich, insbesondere bei Messungen in Abgas, dessen Temperatur nur wenig über der Taupunkttemperatur liegt, das Entnahmesystem so lange vorzuwärmen, dass Taupunktunterschreitungen im Impaktor vermieden werden. Die Vorwärmung kann grundsätzlich extern in einem Ofen durchgeführt werden oder durch eine ausreichend lange Verweilzeit des Impaktors vor der Messung im Abgasstrom. Dabei muss die Sondenöffnung in Strömungsrichtung des Abgases ausgerichtet sein, damit nicht bereits vor der Messung Partikel in den Impaktor gelangen.

Während der Absaugzeit (Probenahmedauer) ist die Sonde in den einzelnen Messpunkten stets entgegen der Strömungsrichtung des Abgases auszurichten.

Die Absaugzeit des Impaktors sollte so bemessen sein, dass einerseits pro Impaktorstufe eine mit ausreichender Genauigkeit wägbare Staubmasse gesammelt wird, andererseits eine Überladung der Stufen vermieden wird.

Am Ende einer Einzelmessung oder beim Wechseln des Entnahmesystems in eine andere Messöffnung ist jeweils vor dem Abschalten des Absaugeaggregats das Absperrventil zu schließen, um Rückströmungen durch den Impaktor zu vermeiden. Danach ist die Sonde in Strömungsrichtung auszurichten und aus dem Abgaskanal zu entfernen. Impaktor bzw. Impaktoreinsatz werden aus der Messeinrichtung ausgebaut. Bis zur Auswertung ist der Impaktoreinsatz staubdicht aufzubewahren. Trocknen und Rückwägen von Sammelplatten und Endfilter erfolgen unter gleichen Bedingungen wie bei der Bestimmung der Leermasse. Dabei können mögliche Veränderungen des aufgefangenen Staubes die Trocknungstemperatur der belegten Sammelplatten und Endfilter begrenzen.

Ablagerungen im Entnahmesystem sind zu erfassen und bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Die Sammelplatten der einzelnen Impaktorstufen und das Endfilter sollten vor bzw. nach der Rückwägung einer weiteren Kontrolle unterzogen werden, um möglichen Fehlmessungen bzw. -interpretationen vorzubeugen:

- Ist eine Verfärbung des Endfilters zu erkennen, so ist möglicherweise während der Probenahme oder unmittelbar danach Kondensat in das Endfilter zurückgelaufen oder der Taupunkt im Impaktor während der Messung unterschritten worden. Dieser Fehler täuscht im Ergebnis eine zu kleineren Partikeldurchmessern verschobene Größenverteilung vor.
- Falls die Staubablagerungen auf den Sammelplatten nicht deutlich abgegrenzt sind, ist auf eine Überladung der entsprechenden Stufe zu schließen. Daraus kann eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung resultieren. Das Aussehen möglicher Beladungsprofile ist in den Abbildungen unter „Tipps bei der Probenahme“ dargestellt.

#### 4.3.5 Behandeln der Impaktoreinsätze

Die Impaktoreinsätze sind mit äußerster Sorgfalt zu behandeln. Für den Transport können Behälter von Gothe eingesetzt werden, in denen mehrere Einsätze in separaten Kammern untergebracht werden. Die Behälter sind nur senkrecht zu transportieren. Sie dürfen weder gekippt noch großen Erschütterungen ausgesetzt werden. Der Ein- und Ausbau der Impaktoreinsätze hat an einem zugfreien Ort zu erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass Sammelplatten und Endfilter nicht beschädigt oder verunreinigt werden.

Steht am Messort kein Labor zur Verfügung, müssen die gebrauchten Impaktoreinsätze mit der notwendigen Umsicht in das eigene Labor zurücktransportiert werden.

#### 4.3.6 Auswerten der Impaktoreinsätze im Labor

Bevor Sammelplatten und Endfilter nach der Probenahme gewogen werden, sind sie wieder, entsprechend ihrer Vorbehandlung, einzeln in dieselben gekennzeichneten Wiegeschälchen zu legen sowie 1 h im Trockenofen einer Temperatur von 180°C auszusetzen und im Exsikkator abzukühlen.

Lose auf den einzelnen Stufen des Kaskadenimpaktors liegender Staub ist mitzuwiegen. Bei ausreichend belegten Impaktorstufen genügt eine Waage mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 mg.

#### 4.3.7 Auswerten des Einlaufkonus

Zur Auswertung sollte die im Einlaufkonus abgeschiedene Staubmasse durch Differenzwägung bestimmt werden. Dabei ist eine Wiegegenauigkeit von 0,1 mg anzustreben. Ist eine Differenzwägung nicht möglich, so muss die abgeschiedene Staubmasse quantitativ aus dem Einlaufkonus in ein Wiegeschälchen überführt werden.

Dazu wird der Einlaufkonus ausgewaschen. Zunächst ist dieser von außen gründlich zu säubern. Der so gereinigte Einlaufkonus wird anschließend mit Alkohol ausgespült.

Die Staubmasse kann durch Ausfiltrieren an einem Membranfilter mit ca. 1 bis 2 µm Porenweite aus der Suspension bestimmt werden. Sind lösliche Substanzen enthalten, ist die Suspension zur Massenbestimmung einzudampfen.

#### 4.3.8 Messungen bei hohem Wasserdampfanteil

Bei Abgasen mit hohem Wasserdampfanteil kann die Bestimmung des durch den Kaskadenimpaktor durchgesetzten Gasvolumens durch Fehler bei der Messung des Wasserdampfanteils beeinträchtigt sein. Wird das Gasvolumen mittels eines Volumenzählers mit vorgeschaltetem Trockenturm gemessen, ist eine sorgfältige Messung des Wassertaupunktes notwendig, um den Fehler bei der Umrechnung des trockenen auf das feuchte Gasvolumen gering zu halten. Dies gilt insbesondere bei Wassertaupunkten über 80°C.

Liegt die Abgastemperatur nur wenig über dem Taupunkt oder ist sie gleich dem Taupunkt, so ist der Kaskadenimpaktor vor dem Einbau in den Abgaskanal extern um ca. 50°C über die Abgastemperatur aufzuheizen. Nach dem Einbau ist zu warten, bis sich die Temperatur des Kaskadenimpaktors der Abgastemperatur angeglichen hat. Erfahrungsgemäß sind hierfür 15 min ausreichend. Kondensationen im Kaskadenimpaktor werden so vermieden.

Durch Verwendung einer beheizten Drosselmessstrecke in Verbindung mit einem beheizten Absaugerohr kann der Volumenstrom durch den Kaskadenimpaktor einschließlich des Wasserdampfanteils direkt gemessen werden.

In übersättigten Abgasen mit Tröpfchenbildung muss in der Regel eine beheizte Entnahmeeinrichtung mit außerhalb des Abgaskanals betriebenem Kaskadenimpaktor eingesetzt werden. Vorhandene Tröpfchen trocknen bei dieser Anordnung ein und bilden aus gelösten und ungelösten Verunreinigungen Restkerne, die als wesentlich kleinere Feststoffpartikeln auf den entsprechenden Kaskadenimpaktorstufen abgeschieden werden. Wegen verstärkter Abscheidung grober Partikeln in der Entnahmeeinrichtung ist die Verwendung dieser Anordnung auf Partikeln mit Durchmessern unter 4 µm begrenzt.

### 4.3.9 Auswahl geeigneter Entnahmesonden

Der Volumenstrom eines Kaskadenimpaktors kann nicht frei gewählt werden, sonst wird die Lage der Trenngrenzen der einzelnen Impaktorstufen verschoben. Es ist daher notwendig, den Impaktor während der Messung mit konstantem Volumenstrom zu betreiben. Im Hinblick auf eine annähernd geschwindigkeitsgleiche Teilstromentnahme ist ein Satz geeigneter Entnahmesonden erforderlich. Der geeignete Sondendurchmesser wird in Abhängigkeit vom angestrebten Teilvolumenstrom und der Abgasgeschwindigkeit nach folgender Beziehung über die mitgelieferte Excel-Datei ermittelt:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}}$$

d = Durchmesser der Entnahmesonde in m

V = Teilvolumenstrom unter Betriebsbedingungen in m<sup>3</sup>/s

W = Geschwindigkeit des Abgases in m/s.

Aus dem Satz der vorhandenen Entnahmesonden ist für die Messung diejenige auszuwählen, deren Querschnittsfläche den Abmessungen der berechneten Sonde am nächsten kommt. Im praktischen Einsatz haben sich Sonden bewährt, deren Querschnittsflächen jeweils um den Faktor 1 abgestuft sind. Dabei sollte der Sondendurchmesser nicht kleiner als 3 mm sein.

Bei Einsatz von gekrümmten Sonden (Schwanenhalsdüsen) sollte diese, wegen der verstärkten Abscheidung grober Partikeln in einer gekrümmten Sonde, nur für Partikeln mit Durchmessern unter 4 µm eingesetzt werden.

### 4.3.10 Berechnen des Teilvolumenstromes

Der abzusaugende Teilvolumenstrom wird mit der beiliegenden Software berechnet.

Dieser ist auf den Gaszustand im Gasvolumenzähler umzurechnen:

$$V_z = V_m \cdot \frac{T_z \cdot P_m}{T_m \cdot P_z} \cdot S$$

V<sub>z</sub> = Volumenstrom im Gasvolumenzähler m<sup>3</sup>/s

V<sub>m</sub> = Teilvolumenstrom unter Betriebsbedingungen in m<sup>3</sup>/s

T<sub>z</sub> = Temperatur des Gases im Gasvolumenzähler in K

T<sub>m</sub> = Temperatur des Gases an der Messstelle (Abgaskanal) in K

P<sub>z</sub> = absoluter Druck im Gasvolumenzähler in bar

P<sub>m</sub> = absoluter Druck an der Messstelle (Abgaskanal) in bar

S = Verhältnis der Volumina des trockenen und des feuchten Gases

T<sub>z</sub> und P<sub>z</sub> sind zunächst nicht bekannt. Es müssen Schätzwerte als erste Näherung in die Rechnung eingesetzt werden. Auf der Basis dieser Schätzwerte wird die erste Einstellung des Volumenstromes durch den Impaktor vorgenommen. Bei genügend langer Messdauer kann mit den sich zu Beginn der Messung einstellenden Werten nachkorrigiert werden.

Für eine kurze Messdauer empfiehlt es sich, die mit den geschätzten Werten für Temperatur und Druck am Gasvolumenzähler gefundene Einstellung beizubehalten, da sonst die zum Einstellen des Volumenstromes notwendige Zeit einen zu großen Anteil an der Messdauer beansprucht.

Der Volumenstrom V<sub>z</sub> lässt sich mit Hilfe eines Schwebekörperdurchflussmessgerätes kontrollieren.

#### 4.3.11 Abschätzen der Messdauer

Die Dauer der Messung lässt sich aus der angestrebten Beladung des Impaktors und dem Staubgehalt des Abgases nach folgender Beziehung abschätzen:

$$T = \frac{m}{q_f \cdot V_m} = \frac{m}{q_{tr} \cdot V_z}$$

T = Dauer der Messung in s

M = angestrebte Beladung des Impaktors in mg

$V_m$  = Teilvolumenstrom unter Betriebsbedingungen in  $m^3/s$

$V_z$  = Volumenstrom im Gasvolumenzähler in  $m^3/s$

$q_f$  = Staubmassenkonzentration im Abgas, bezogen auf den Betriebszustand in  $mg/m^3$

$q_{tr}$  = Staubmassenkonzentration im trockenen Gas, bezogen auf den Zustand bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck in  $mg/m^3$ .

Die Beladbarkeit des Kaskadenimpaktors hängt u.a. von der Partikelgrößenverteilung ab. Für enge Partikelgrößenverteilungen können sich wegen möglicher Überladung einzelner Stufen wesentlich kürzere Messdauern ergeben. Im Zweifelsfall, z.B. wenn der Staubgehalt nicht bekannt ist, muss die Messdauer aus der visuellen Beurteilung der beaufschlagten Sammelplatten nach dem ersten Einsatz abgeschätzt werden. Dies ist nur mit einiger Erfahrung möglich. Besser ist es, die erste Messung exakt auszuwerten und dann den Impaktor bei der wiederholten Messung gezielter einzusetzen.

### 5 Auswerten der Messdaten

Als unmittelbares Ergebnis einer Impaktormessung erhält man durch Wägung die auf den einzelnen Sammelplatten impaktierte Staubmasse. Die Summe der Prallplatten PM 2,5 und Backup-Filter ist die sogenannte PM 10 Fraktion. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner  $10 \mu m$  sind zu 50% erfasst. Die Verteilung größerer und kleinerer Partikel folgen der Kalibrierkurve PM 10. Die Masse des Backup-Filters ist die sog. PM 2,5 Fraktion. Alle Partikel unter einem aerodynamischen Durchmesser von  $2,5 \mu m$  wurden zu 50 % gesammelt. Die Verteilung größerer und kleinerer Partikel folgen der Kalibrierkurve PM 2,5.

### 6 Verfahrenskenngrößen und Anwendungsbereiche

Die nachfolgend genannten Verfahrenskenngrößen müssen eingehalten werden:

- Reynolds-Zahlen für die Strömung in den Düsen müssen im Bereich  $100 < Re < 3000$  liegen. Mit der Excel-Datei wird auch die Reynolds-Zahl berechnet.

#### 6.1 Impaktorbeladung

Grundsätzlich sind hohe Beladungen des Impaktors günstig für die Auswertung, sie verringern den Einfluss von Wiegefehlern. Für die Beladung sind im Mittel 2 bis 10 mg je Stufe anzustreben.

In Fällen, in denen die stoffliche Zusammensetzung, des Staubes bekannt ist, kann bei Einsatz eines maßanalytischen Bestimmungsverfahrens, das eine ausreichende Nachweisempfindlichkeit hat, mit niedrigeren Impaktorbeladungen gearbeitet werden.

#### 6.2 Staubgehalt

Die Grenzen für den Staubgehalt des Abgases, innerhalb denen der Impaktor eingesetzt werden kann, ergeben sich aus der Beladbarkeit und der Forderung nach einer vernünftigen Messdauer. Dabei kann der Johnas auch in Staubmengen deutlich größer als  $100 mg/m^3$  eingesetzt werden.

### 6.3 Temperaturbereich

Der Temperaturbereich wird durch das Titan begrenzt (max. 400°C)

### 7 Fehlermöglichkeiten und Fehlerbewertung

Die Messfehler und ihre Einflüsse auf die Kenngrößen lassen sich wie folgt abschätzen:

#### a) Staubmassen auf den einzelnen Impaktorstufen und dem Endfilter

Fehler bei der Bestimmung der Staubmassen können entstehen durch

- unsachgemäße Handhabung des Impaktors (Kondensatbildung infolge Taupunktunterschreitung, mechanische Beschädigung der Sammelplatten, Verfrachtung von impaktierten Partikeln infolge Überladung einzelner Impaktorstufen, mangelnde Haftung der Partikeln bei Verwendung ungeeigneter Sammelplatten.
- Einflüsse des Abgases auf die Sammelplatten (Massenzunahme oder -abnahme durch Sorption und chemische Reaktion des Plattenmaterials mit einzelnen Komponenten des Abgases
- thermische Instabilität der Sammelplatten (Bindemittelschwund, unzureichende Konditionierung, falsche Ausheiztemperatur oder Ausheizdauer
- Wiegefehler (begrenzte Ablesegenauigkeit der verwendeten Waage

Bei sachgerechter Handhabung des Impaktors und richtiger Auswahl der Sammelplatten gemäß diesen Anweisungen lässt sich der Fehler in der Massenbestimmung für die einzelnen Impaktorstufen sowie das Endfilter auf  $\pm 0,5$  mg begrenzen. Dies bewirkt einen Fehler der Durchgangssumme bzw. Rückstandssumme von ca.  $\pm 3\%$ .

#### b) Zusammensetzung des Abgases

Fehler in der Bestimmung der Zusammensetzung des Abgases wirken sich auf die Berechnung der Gasviskosität und bei der Umrechnung des trockenen Gasvolumens, ermittelt mit einem Gasvolumenzähler, auf das feuchte Gasvolumen im Betriebszustand aus. Wird der Volumenanteil der einzelnen Komponenten mit einem relativen Fehler von weniger als 5% bestimmt, so ist der Einfluss auf die Gasviskosität vernachlässigbar.

Bei einem Wasserdampfanteil des Abgases bis zu 50% lässt sich dieser mit einem relativen Fehler von  $\pm 2\%$  bestimmen. Dies ergibt für das durch den Impaktor durchgesetzte Gasvolumen einen relativen Fehler von  $\pm 1\%$ . Bei höheren Wasserdampfanteilen sollte die Volumenbestimmung mittels einer Drosselmessstrecke erfolgen.

#### c) Temperatur des Abgases

relativer Fehler ca.  $\pm 0,5\%$

#### d) Drücke des Abgases

statischer Druck: relativer Fehler ca.  $\pm 0,2\%$

dynamischer Druck: relativer Fehler ca.  $\pm 10\%$

e) Durchgesetztes Teilvolumen – Messung mit Gasvolumenzähler

relativer Fehler ca.  $\pm 2\%$

f) Temperatur des Teilvolumenstroms im Gasvolumenzählers

relativer Fehler ca.  $\pm 2\%$

Fehler in der Bestimmung der Messdauer sind in der Regel vernachlässigbar. Bei extrem kurzer Messdauer (unter 3 min) muss wegen der Einstellung des Volumenstromes jedoch mit einem relativen Zeitfehler von 5% gerechnet werden.

## **8 Warten und Überprüfen der Messeinrichtung**

### **8.1 Wartungsarbeiten im Laboratorium**

Nach jedem Messeinsatz ist der Impaktor sorgfältig zu reinigen. Insbesondere sind die Gewinde des Impaktorgehäuses mit einer feinen Messingdrahtbürste zu reinigen. Durch diese Maßnahme kann einem Festsetzen verschmutzter Gewinde im praktischen Einsatz vorgebeugt werden.

Die Düsenplatten sind nach jedem Einsatz im Ultraschallbad zu reinigen und durch Sichtkontrolle auf mögliche Beschädigungen zu überprüfen. In größeren Zeitabständen empfiehlt sich eine Kontrolle der Düsenplatten unter dem Mikroskop.

In vorgegebenen Zeitabständen sollte die Kalibrierung des Gasvolumenzählers oder der Drosselmessstrecke sowie der Temperatur- und Druckmesseinrichtungen überprüft werden, um Beeinträchtigungen der Messgenauigkeit durch zum Teil korrosive Abgase zu vermeiden.

### **8.2 Überprüfen der Messeinrichtung vor dem Einsatz**

Beim Einbau oder Austausch des Impaktoreinsatzes ist darauf zu achten, dass kein Schmutz von den Impaktorbauteilen auf den Impaktoreinsatz gelangt.

Vor Beginn jeder Messung ist die gesamte Messeinrichtung auf Dichtheit zu prüfen. Dazu ist die Sondenöffnung mit einem Stopfen zu verschließen und im Meßsystem ein Unterdruck von ca. 150 mbar zu erzeugen. Dies entspricht dem drei- bis vierfachen des während der Messung erwarteten Unterdrucks. Wenn weder das Schwebekörperdurchflussmessgerät noch der Gasvolumenzähler dabei einen Gasvolumenstrom anzeigen, ist die Messeinrichtung dicht.

Die Silikagelfüllung des Trockenturmes ist rechtzeitig zu erneuern (Indikatorfärbung beachten) und, soweit vorhanden, die Kondensatfalle zu entleeren.

## **9 Einsatzmöglichkeiten**

Der Johnas eignet sich zur Bestimmung der PM 10 und PM 2,5-Verteilung von Partikeln in strömenden Gasen. Sie lassen sich Lage unabhängig, also sowohl in vertikalen als auch in schrägen oder horizontalen Abgaskanälen einsetzen.

Erfahrungen über seinen Einsatz liegen für zahlreiche Anlagen vor (siehe LUA-NRW: Jahresbericht '99 – <http://www.lua.nrw.de/veroeffentlichungen/jahresberichte/1999/haupt1a.pdf>-

## **Tipps bei der Probenahme:**

### **Isokinetische Absaugung:**

Die geschwindigkeitsgleiche Absaugung wird nur selten möglich sein. In der Regel wird der von der Excel-Datei vorgeschlagene Düsendurchmesser nicht verfügbar sein. Vorliegen sollte aber ein Düsenersatz in 1 mm Schritten. Die Fehler bei zu hoher Absauggeschwindigkeit sind kleiner, als bei zu geringer. Die Trenndurchmesser sind in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit im Impaktor. Deshalb kann die geschwindigkeitsgleiche Absaugung nur über die Wahl der Düse eingehalten werden. Niemals darf die Geschwindigkeit im Impaktor, also auch die Absauggeschwindigkeit geändert werden. Gewählt wird die Düse mit dem nächst kleinerem Durchmesser, es sei denn, die Differenz zum nächst höheren Durchmesser ist deutlich kleiner. Dadurch erhöht sich die Geschwindigkeit in der Düsen Spitze und die Absaugung erfolgt mit erhöhter Geschwindigkeit. Je weniger die gewählte Düsenöffnung von der Excel-Datei vorgeschriebenen abweicht, um so eher sind die Anforderungen der Isokinetik erfüllt. Wenn sich Temperatur oder der Druck, bzw. allgemein die Dichte des Gases ändert, muß die Geschwindigkeit im Impaktor neu berechnet werden. Dann muß auch die Absauggeschwindigkeit geändert werden. Ohne Fehler wird es niemals gehen. Welcher Fehler mehr von Bedeutung ist, muß der Fachmann vor Ort entscheiden. Bei Partikeln kleiner 5 µm können Abweichungen von der Isokinetik vernachlässigt werden. Mehr von Bedeutung ist die Lage der Trenndurchmesser. Bei Änderung der Dichte sollte die Geschwindigkeit im Impaktor angepaßt werden. Nur so kann überhaupt eine Aussage getroffen werden. Verschieben sich die Trenndurchmesser zu stark, ist keine Auswertung möglich. Die VDI-Richtlinie 2066, Blatt 10 gibt hier gute Informationen, die zur Entscheidung beitragen können.

### **Auswertung:**

Zur Auswertung können alle Sammelplatten verwendet werden. Die Summe aus der Sammelplatte PM 2,5 und dem Back-Up-Filter ist die sog. PM 10-Fraktion. Der Back-Up-Filter enthält die sog. PM 2,5-Fraktion.

Sollen auch die Partikel größer PM 10 berücksichtigt werden, so sind die Partikel auf der ersten Filterplatte und die Ablagerungen im Konus zusammen auszuwiegen.

Die einzelnen Filterplatten werden konditioniert und nach der Messung entsprechend der VDI 2066 Blatt 10 behandelt.

### **Partikel im Eingangskonus:**

In der Regel werden bei Gesamt-Staubmessungen nach VDI 2066, Blatt 7 keine Ablagerungen im Eingangskonus vom Filterkopfgerät wahrgenommen. Die dort anhaftenden Staubpartikel sind von der Masse her nicht bedeutend. Dies ist bei der Beprobung mit dem GMU-Kaskadenimpaktor Johnas deutlich anders. Die im Eingangskonus veränderte Strömung verursacht vermehrte Partikelabscheidungen an der Wand. Soll ausschließlich die PM 10 und PM 2,5 - Fraktion bestimmt werden, so können die Partikel im Konus unberücksichtigt bleiben, solange die Ablagerungen keinen Einfluß auf die Strömung im Konus haben. Bilden sich Ablagerungen, die weit in den Konus hineinragen, werden auch Partikel mit kleinem aerodynamischen Durchmesser an diesen Ablagerungen kleben bleiben und stellen somit die gesamte Messung in Frage. Diese Erscheinung wird aber sehr selten sein. In der Regel wird der Konus mit einer dünnen Staubschicht überzogen sein. Diese Staubschicht enthält nach Untersuchungen der Universität Duisburg lediglich Partikel größer PM 10.

Soll nun die Fraktion größer PM 10 ebenfalls bestimmt werden, so müssen die am Konus anhaftenden Partikel zu dem Filter der ersten Prallplatte addiert werden.

Dazu wird der Konus mit Alkohol ausgespült und die Suspension aus Alkohol und Partikel über ein Standardfilter filtriert. Das Filtrieren kann über eine Nutsche mit Vakuum beschleunigt werden. Anschließend wird dieser Filter getrocknet und gemäß VDI 2066 Blatt 10 behandelt.

### Probenahmezeit:

Die Probenahmedauer kann deutlich von der nach TA-Luft geforderten halbstündigen Probenahme abweichen. Die benötigte Probenahmezeit wird durch mindestens zwei Faktoren begrenzt. Zum einem darf kein Filter überladen werden. Bilden sich zu starke Impaktionshügel auf dem Filter, werden auch kleinere Partikel in ihrer Flugbahn gestört und ggf. auf der falschen Prallplatte abgeschieden. Diese Gefahr besteht bei einseitiger Partikelverteilung. Ist dies vor der Probenahme nicht bekannt, kann die Probenahmedauer erst nach Betrachten der einzelnen Prallplatten eingeschätzt werden. Der "Hügel" sollte nicht höher als der Rand vom Innenloch der jeweiligen Prallplatte sein.

Auf der anderen Seite, besteht die Gefahr, das bei zu wenig Staubmasse auf dem Filter, die Stufe mangels Masse nicht ausgewertet werden kann.

Nach den Untersuchungen des Landesumweltamts Essen, sind die Partikel in gefilterten Abgasströmen deutlich unter PM 10. Als Kriterium für die erste Probenahmedauer gilt dann der Druckabfall hinter dem Impaktor. Hier können die Erfahrungen aus der Gesamt-Staubmessung nach VDI 2066, Blatt 7 einfließen. In der Regel ist der Back-Up-Planfilter ausreichend belegt, wenn der Druckabfall über den Filter 200-300 mbar beträgt. Je nach Filtermaterial und Feuchte kann bei höheren Unterdrücken das Filtermaterial einreißen und die Messung unbrauchbar werden lassen. Auch hier gilt es, die Erfahrungen des Mitarbeiters vor Ort sind wichtiger, als sture Vorgaben.

### Einsatzbereich:

Der Einsatzbereich vom Impaktor ist in der Tabelle 1 aufgeführt. Diese Randbedingungen garantieren, daß die Kalibrierdaten auch bei der geänderten Einsatzsituation gelten. Damit die Strömung und die Gesetzmäßigkeiten nach der Theorie von Marple Gültigkeit haben, muß die Reynoldszahl zwischen 100 und 3000 liegen. Die mittlere freie Weglänge des Gases sollte in der Größenordnung für Gase sein (~ 65 nm). Beide Größen sind abhängig von der Temperatur, Druck und der Dichte des Gases. Mit der beiliegenden Excel-Datei werden diese Daten berechnet.

Damit ergibt sich ein deutlich größerer Einsatzbereich des Impaktors. Die Temperatur darf aufgrund des Titans nicht über 400°C sein.

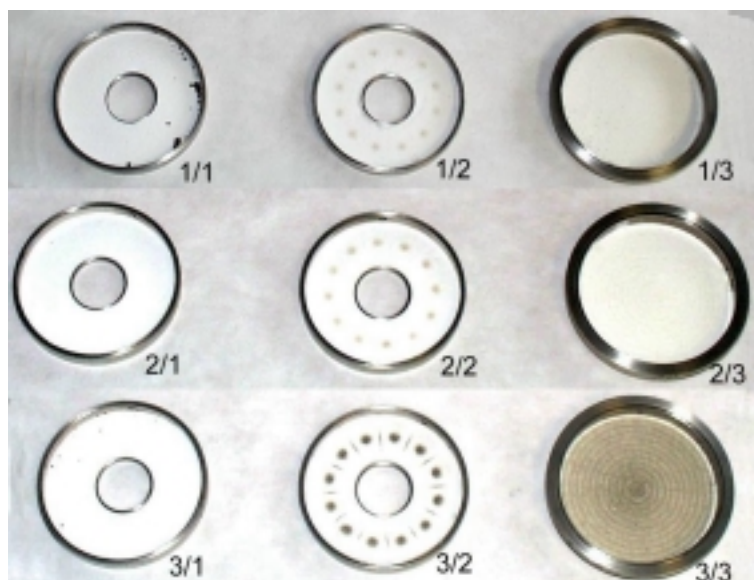
### Feuchtes Abgas:

Die Titanmasse des Impaktors ist erheblich. Die Erwärmung und Temperaturanpassung des Impaktors im Abgasstrom benötigen demzufolge viel Zeit. Wenn der Taupunkt oberhalb der Außentemperatur liegt, sollte der Impaktor vorgewärmt werden. Zum Vorheizen wird die Standard-Filterkopfheizung verwendet. Beachten Sie bitte, daß nicht nur das Aufheizen lange dauert, auch das Abkühlen, wenn der Impaktor zu heiß eingebracht wird. Empfehlenswert ist der Paul Gothe-Temperaturregler mit PID-Steuerung. Der Temperaturregler zeichnet sich durch einfache Bedienung aus und kann in Kombination mit der Filterkopfheizung den Impaktor sehr genau temperieren.

Wichtig: Die Temperatur des Impaktors darf sich während der Probenahme nicht ändern, da sich ansonsten die Trenndurchmesser verschieben. Ein temperierter Impaktor ist also nicht nur bei feuchtem Abgas wichtig.

Beispiele von Filterbelegungen:

- 1: PM-10-Stufe
- 2: PM-2,5-Stufe
- 3: Back-Up-Filter



### **Horizontale Messungen:**

Ist der Impaktor während der Messung horizontal in der Strömung, liegt ein großes Drehmoment an dem Absaugrohr. Damit die Halterung für das Absaugrohr nicht das gesamte Drehmoment aufnehmen muß, kann ein Gegengewicht am Ende vom Absaugrohr montiert werden (Bestell-Nr.: 60.4). Zudem sollte der verstärkte Krümmer verwendet werden.

### **Vergleich mit Gesamt-Staubmessung:**

Die Staubmenge aus allen Prallplatten und die Partikel im Eingangskonus werden nicht die Masse aus einer Gesamt-Staubmessung nach VDI 2066, Blatt 7 ergeben. Wandverluste lassen sich nicht vermeiden. Diese Wandverluste treten bei jedem Impaktor auf. Der GMU-Impaktor Johnas hat durch die optimierte Strömungsführung nur geringe Wandverluste. Dennoch können Minderbefunde bis zu 20% auftreten. Die Ergebnisse der Impaktormessungen sind nicht zur Berechnung der Gesamt-Staubmessung geeignet. Nach Untersuchungen der Gerhard-Mercator-Universität treten die Verluste vorwiegend bei den Partikeln größer PM 10 auf. Die Masse der PM 2,5 und PM 10 Fraktion kann demzufolge auch absolut betrachtet werden.

### **Artefakte-Bildung:**

Impaktoren trennen Partikel nach Ihrem aerodynamischen Durchmesser. Dieser aerodynamische Durchmesser ist eine Funktion von vielen Parametern. Die Masse des Partikels ist nur ein Parameter. Ändert sich die Masse, ändert sich auch der aerodynamische Durchmesser, obwohl der Radius sich nicht zwangsweise ändern muß. Hygroskopische Salzgemische werden demzufolge je nach Luftfeuchte unterschiedliche aerodynamische Durchmesser aufweisen. Semivolatile Substanzen werden zur Zeit der Probenahme eine größere Masse aufweisen, als nach der Messung. Zur Artefakte-Bildung siehe den Bericht von Dr. Th. Kuhlbusch, GMU-Duisburg.

Bei der Auswertung ist nicht nur die Gesamtmasse zu bestimmen, sondern auch die Inhaltsstoffe. Aus der Zusammensetzung der Elemente (Kationen und Anionen) kann ggf. der Deliqueszenzpunkt berechnet und somit die Massenänderungen durch Wassergehalt bzw. die Minderbefunde durch semivolatile Substanzen abgeschätzt werden. Sie sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

### **OUT-STACK-Messungen**

Der Impaktor soll grundsätzlich direkt hinter der Düse im Kamin eingesetzt werden. Ist dies nicht möglich, können Schwanenhalsdüsen eingesetzt werden oder der Impaktor wird hinter dem Krümmer, bzw. hinter dem Absaugrohr platziert. Gleich wie sie den Impaktor einsetzen, die Teile vor dem Impaktor sind Abscheidevorrichtungen unbekannter Art. Die Auswertung ist nur sehr begrenzt möglich. Dies gilt auch für andere Impaktoren, selbst dann, wenn der Hersteller passendes Zubehör anbietet. Die Physik ist nicht eine Funktion des Marketings.

### **Vergleich mit anderen Impaktoren**

Nicht das wir einen Vergleich des Johnas mit anderen Impaktoren scheuen, aber Birnen lassen sich schlecht mit Äpfeln vergleichen. Ein Vielstufen-Impaktor erfaßt nicht gezielt die PM 10 oder PM 2,5 - Fraktion. Die Berechnung der PM 10 und PM 2,5 Masse aus den Stufen ist nicht nur sehr aufwendig, sondern auch mit vielen Fehlermöglichkeiten behaftet. Abweichungen sind nicht selten Ursache falscher Berechnungsdaten. Im Zweifel sind die über einfaches Auswägen erzielten Ergebnisse des GMU-Impaktors Johnas verlässlicher. Kaskadenzyklone sind sog. 3-D-Abscheider und nur für den jeweils kalibrierten Zustand einsetzbar.

### **Spaß**

Den wünschen wir Ihnen, obwohl wir wissen, daß Messungen von PM 10 und PM 2,5 sehr aufwendig sind.

**Tabelle 1:** Mittlere, minimale und maximale Abgasdaten für die Impaktorauslegung

**Tabelle 2:** Ergebnisse der cut-off Überprüfungen der Universität Duisburg:

**Tabelle 3:** Ergebnisse der von der Universität Duisburg durchgeführten Kalibrierungen der Trenndurchmesser ( $d_{(ae)50}$ ):

**Abbildung 1:** Konstruktionszeichnung des GMU - Impaktors *johnas*

**Abbildung 2:** Abscheidekurven der 2.5  $\mu\text{m}$ -Stufe des GMU - Impaktors *johnas*, verglichen mit derjenigen des US WINS PM 2.5-Impaktors (berechnet aus der "penetration efficiency curve")

**Abbildung 3:** Abscheidekurven der 10  $\mu\text{m}$ -Stufe des GMU - Impaktors *johnas*, verglichen mit derjenigen des US PM 10-Inlets (berechnet aus der "effectiveness curve") und der thorakalen Fraktion [20]

**Abbildung 4:** Verteilung des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Teststaubes auf die Impaktorstufen

**Abbildung 5:** Partikelverluste in den Impaktorstufen PM 10 und PM 2.5 in Massenprozent bezogen auf die Gesamtmasse der jeweiligen Stufe

**Foto 1:** Einzelne Module des GMU - Impaktors *johnas*

**Tabelle 1:** Mittlere, minimale und maximale Abgasdaten für die Impaktorauslegung

	Mittel	min	max
Konzentration [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]	10	1	100
Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	135	20	250
Druck [mbar]	1000	850	1100
Feuchte [ $\text{g}/\text{Nm}^3$ ]	30	0	100
Gaszusammensetzung	Luft		30% $\text{CO}_2$
Kaminöffnung	Standard 3"		

**Tabelle 2:** Ergebnisse der cut-off Überprüfungen der Universität Duisburg:

	geometrischer Durchmesser	aerodynamischer Durchmesser	cut off Johnas 2
PM 10-Stufe	10,00 $\mu\text{m}$	10,25 $\mu\text{m}$	51,8 $\pm$ 6,5 %
PM 2,5-Stufe	2,495 $\mu\text{m}$	2,56 $\mu\text{m}$	49,4 $\pm$ 2,1 %

**Tabelle 3:** Ergebnisse der von der Universität Duisburg durchgeführten Kalibrierungen der Trenndurchmesser ( $d_{(ae)50}$ ):

	$d_{(ae)50}$	Abweichung	Toleranzen lt. US-EPA
PM 2,5-Stufe	2,53 $\mu\text{m}$	+ 1,2 %	$\pm$ 8 %
PM 10-Stufe	9,95 $\mu\text{m}$	- 0,5 %	$\pm$ 5 %

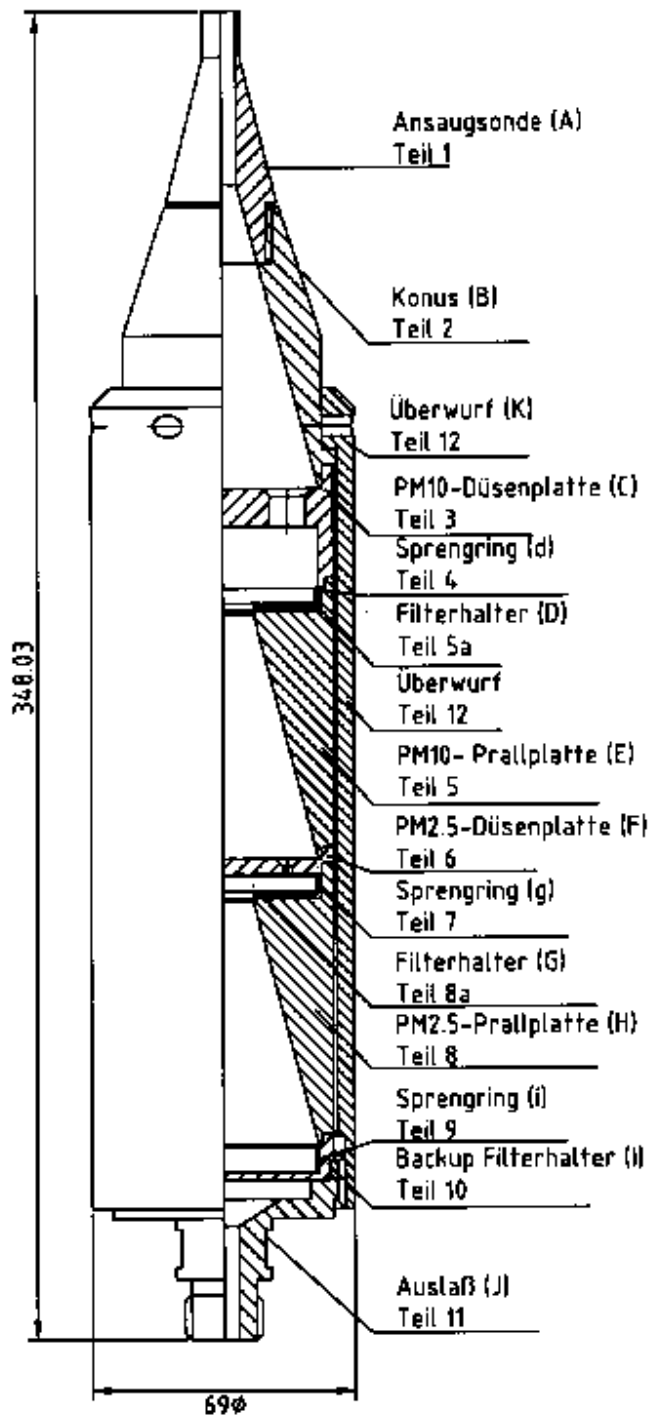
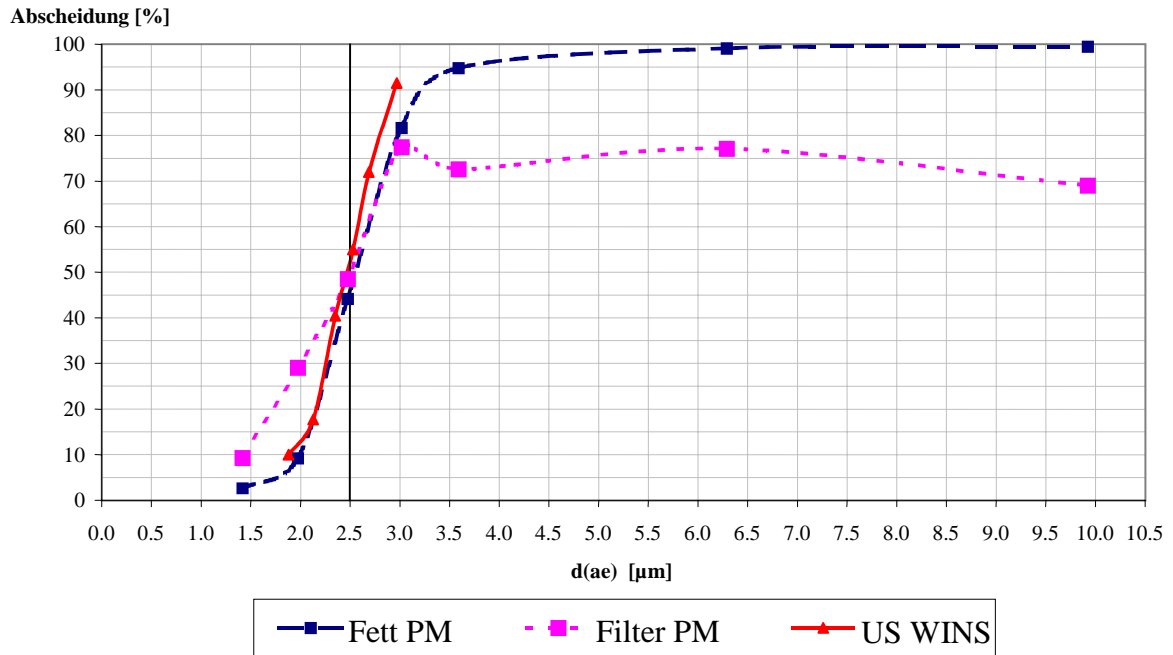
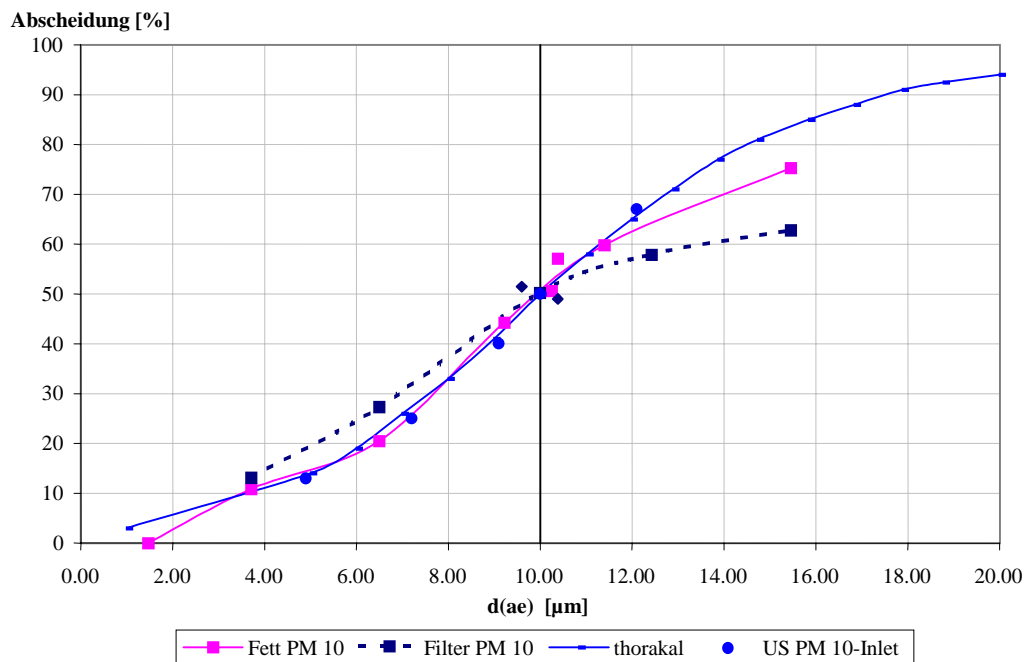


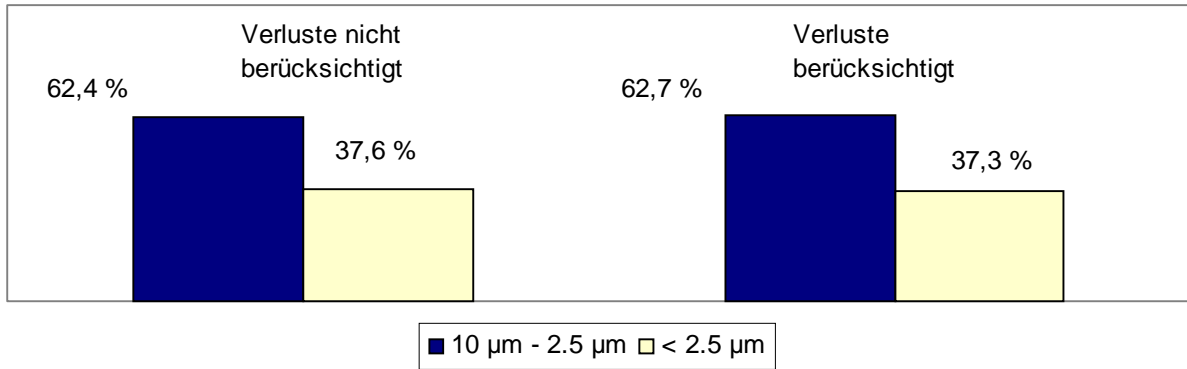
Abbildung 1: Konstruktionszeichnung des GMU - Impaktors *johnas*



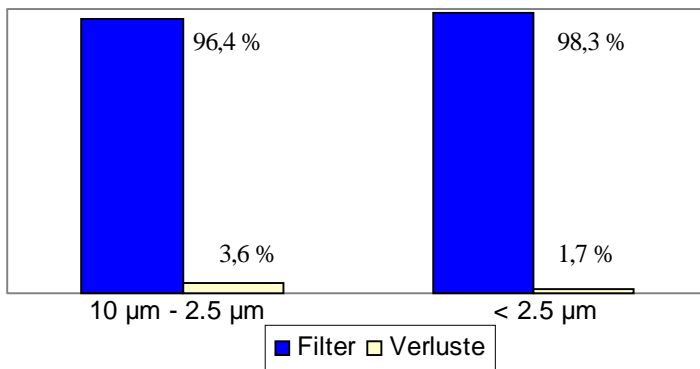
**Abbildung 2:** Abscheidekurven der 2.5 µm-Stufe des GMU - Impaktors *Johnas*, verglichen mit derjenigen des US WINS PM 2.5-Impaktors (berechnet aus der "penetration efficiency curve")



**Abbildung 3:** Abscheidekurven der 10 µm-Stufe des GMU - Impaktors *Johnas*, verglichen mit derjenigen des US PM 10-Inlets (berechnet aus der "effectiveness curve") und der thorakalen Fraktion [20]



**Abbildung 4:** Massenverteilung des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Teststaubes auf die Impaktorstufen

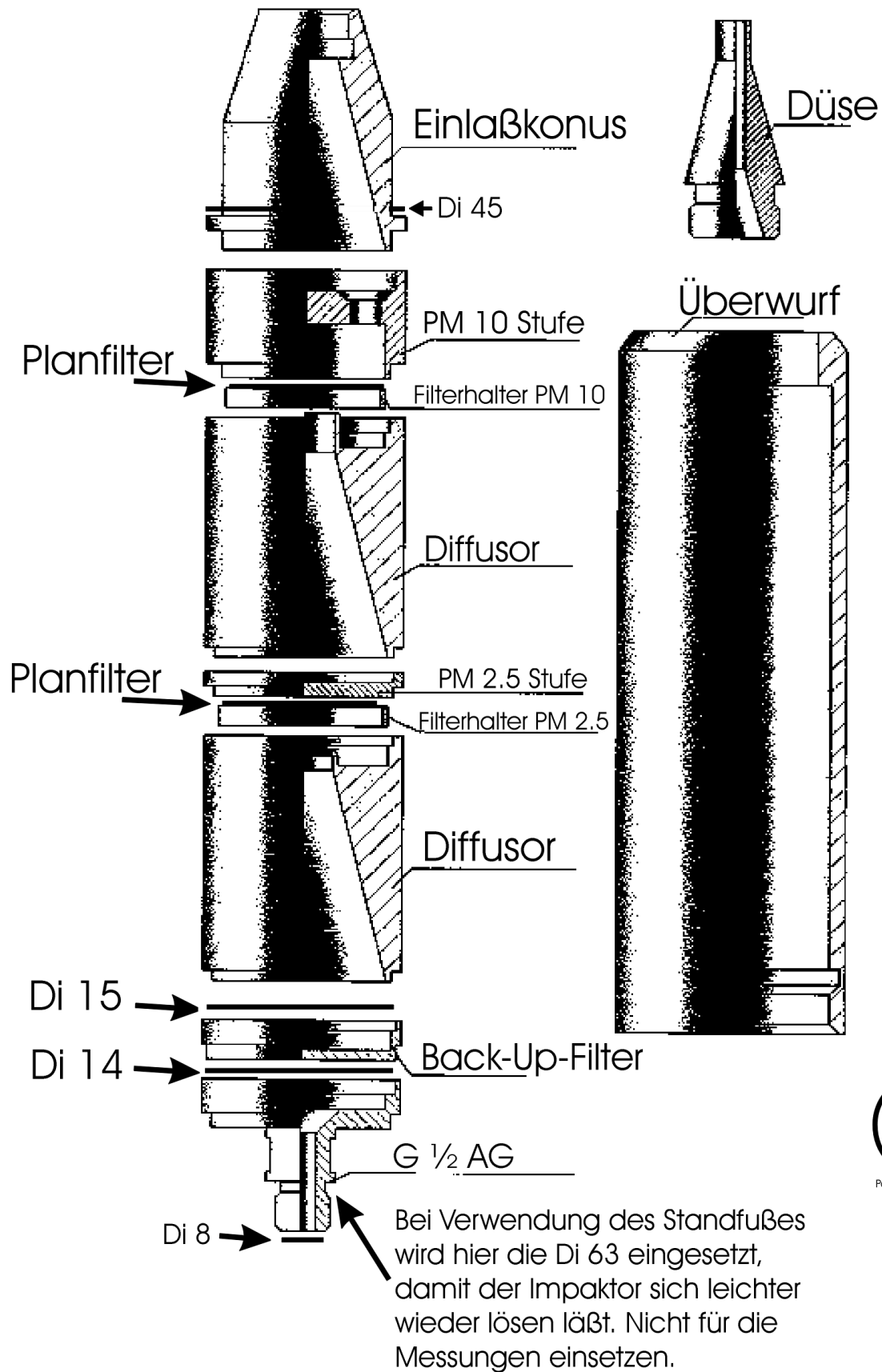


**Abbildung 5:** Partikelverluste in den Impaktorstufen PM 10 und PM 2.5 in Massenprozent bezogen auf die Gesamtmasse der jeweiligen Stufe

**Foto 1:** Einzelne Module des GMU - Impaktors *johnas*



Abbildung 6: Dichtungen



**Attention – In case of using the excel-file, this following license agreement will be accepted by the user!  
Achtung – Wird die Excel-Datei verwendet, akzeptiert der Benutzer diese folgende Lizenz-Vereinbarung!**

### **Excel-Berechnungsdatei für den Kaskadenimpaktor Johnas**

Die auf dem Datenträger enthaltene Excel-Datei fällt unter den Schutz des Urheberrechtsgesetzes. Alle Urhebernutzungsrechte und andere geistigen Eigentumsrechte in Bezug auf die Datei verbleiben dem Programmautor und dem Lizenzgeber. Der Anwender erhält eine beschränkte, nicht ausschließliche und widerrufliche Lizenz zur Verwendung der Datei. Der Anwender verpflichtet sich, die Datei weder zu irgendwelchen Zwecken an andere Benutzer zu verleihen, zu vermieten, zu leasen oder zu unterlizenzieren.

Der Anwender verpflichtet sich, die Datei in angemessener Weise vor unbefugter Benutzung, Modifizierung, Vervielfältigung, Verteilung und Veröffentlichung zu schützen. Der Anwender erhält das Recht, zu Sicherheitszwecken eine Kopie der Datei anzufertigen zu können. Für Verwendungen und Kopien der Datei zu anderen als in der Richtlinie angegebenen Belangen besteht keine Befugnis. Unverzüglich nach Erhalt des beiliegenden Datenträgers erfolgt eine Abnahmeprüfung durch den Anwender. Hierbei eventuell festgestellte Fehler wird der Lizenzgeber innerhalb von vierzehn Tagen beseitigen oder Ersatz liefern. Jede weitere Gewährleistung wird ausgeschlossen. Die hinter der Datei stehenden Modelle oder Modellvorstellungen stellen den Stand der Technik zur Zeit der Entwicklung der Datei dar. Für die Richtigkeit der Formeln, Modelle und/oder Programme wird keine Gewähr übernommen. Garantien bezüglich der Nutzung und Eignung der Datei für einen bestimmten Zweck werden nicht gegeben. In allen Fällen ist die Haftung auf den Datenträgerpreis begrenzt.

Die auf dem Datenträger enthaltene Dateiversion kann jederzeit vom Lizenzgeber für ungültig erklärt werden. Wird die Richtlinie VDI 2066 Blatt 10 zurückgezogen oder durch eine Neuauflage ersetzt, so verliert auch die dazugehörige Datei ihre Gültigkeit.

Paul Gothe, Bochum den 10.12.03

### **Excel-calculation-file for the Cascade impaktor Johnas**

The Excel-file on the data disk falls under the protection of the copyright-law. All originator-usufructs and other mental titles in reference on the file remain by the program-author and the licensor. The user gets a limited, not exclusive and revocable license to the application of the file. The user commits himself neither to lend the file to any purposes to other users to rent to lease or to under-license.

The user commits himself to protect the file in appropriate manner from unauthorised use, modification, duplication, distribution and publication. The user gets the right, to prepare a copy of the file for the security. Instantaneously after receipt of the enclosed data carrier, a decrease-examination takes place through the user. On this occasion possibly determined mistake will remove by the licensor within fourteen days or will deliver substitute. Each more guarantee is excluded. The models standing behind the calculation or model-ideas represent the stand of the technology at the time of the development of the file. For the correctness of the formulas, models and/or programs is taken on no assurance. Guarantees respecting the utilization and suitability of the file for a certain purpose are not given. In all cases, the liability is restricted on the data carrier-price.

That on the data carrier existing file-version can be explained by the licensor for invalid at anytime. The guideline VDI 2066 part 10 is withdrawn or is replaced with a reprint, so also the pertinent file loses their validity.

Paul Gothe, Bochum the 2003-12-10,