

Deutscher Wetterdienst



**Berichte des Deutschen Wetterdienstes**

**215**

**Qualitätssicherung von Messreihen:  
Untersuchungen zu Sammelverlusten  
eines Berner Niederdruck-Impaktors**

von  
Uwe Kaminski, Peter Winkler,  
Margarete Fricke, Suzanne Sohmer  
und Knut Sommerer

Zur Herstellung dieses Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

ISSN 0072-4130  
ISBN 3-88148-371-3

---

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Deutschen Wetterdienstes in irgendeiner Form (Fotokopien, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

---

**Herausgeber und Verlag:**

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main

**Anschriften der Autoren:**

Dipl.-Met. Uwe Kaminski  
Dr. Peter Winkler  
Margarete Fricke  
Suzanne Sohmer  
Deutscher Wetterdienst  
Meteorologisches Observatorium  
Hohenpeißenberg  
Albin-Schwaiger-Weg 10  
82383 Hohenpeißenberg

Knut Sommerer  
InAMed GmbH  
Institut f. Aerosolmedizin  
Robert-Koch-Allee 29  
82131 Gauting

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>7</b>
<b>2 IMPAKTOR THEORIE.....</b>	<b>9</b>
2.1 PRINZIP DER IMPAKTIONSABSCHEIDUNG .....	9
2.2 BERECHNUNG VON PARTIKELBAHNEN .....	11
2.3 FEHLERQUELLEN BEI IMPAKTORMESSUNGEN .....	13
<b>3 MESSUNGEN MIT DEM BERNER NIEDERDRUCK-IMPAKTOR .....</b>	<b>14</b>
3.1 KENNDATEN DES BERNER IMPAKTORS.....	15
<b>4 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR FEUCHTEABHÄNGIGKEIT DER AEROSOLPROBENAHEME MIT HILFE VON IMPAKTOREN .....</b>	<b>17</b>
4.1 BERNER NIEDERDRUCK-IMPAKTOR.....	17
4.2 SCHLITZ-IMPAKTOR (MODELL JUNGE).....	19
<b>5 TEST DES BERNER IMPAKTORS.....</b>	<b>22</b>
5.1 VERSUCHSAUFBAU.....	22
5.2 VISUALISIERUNG VON WANDVERLUSTEN UND FEHLABSCHIEDUNGEN IM BERNER IMPAKTOR .....	25
5.2.1 DIGITALE AUFNAHMEN VON NEBENABSCHIEDUNGEN IM IMPAKTOR.....	25
5.3 QUANTIFIZIERUNG DER WANDVERLUSTE IM BERNER IMPAKTOR.....	31
5.4 UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUß DER FEUCHTE AUF DEN "BOUNCING"-EFFEKT .....	32
5.5 UNTERSUCHUNGEN ZUR GRÖßENSELEKTION DES BERNER IMPAKTORS.....	38
<b>6 DISKUSSION UND KORREKTUR DER MEßWERTE.....</b>	<b>40</b>
<b>7 PARALLEL BETRIEB VON SCHLITZ-IMPAKTOR UND BERNER IMPAKTOR.....</b>	<b>49</b>
<b>8 SCHLUßFOLGERUNG.....</b>	<b>56</b>
<b>9 LITERATUR.....</b>	<b>58</b>
<b>10 ANHANG.....</b>	<b>60</b>

## **Zusammenfassung**

Impaktoren ermöglichen eine größenabhängige Auftrennung und Abscheidung von atmosphärischen Aerosolpartikeln sowie die nachgeschaltete chemische Analyse dieser Partikelfraktionen. Leider sind diese Instrumente mit dem Mangel behaftet, daß Partikeln auf den Abscheideflächen nicht immer haften bleiben, sondern abprallen und auf der nachfolgenden Stufe gesammelt werden.

Die vorliegende Untersuchung widmet sich den Sammelverlusten eines Berner Niederdruck Impaktors. In Zusammenarbeit mit der InAMed GmbH in 82131 Gauting wurden radioaktiv markierte Testaerosole erzeugt und die Sammeleigenschaften des Impaktors unter verschiedenen Feuchtebedingungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß der Impaktor, wenn auf den Abscheideflächen kein Haftmittel eingesetzt wird, erst bei relativen Feuchten größer etwa 60 % ein geeignetes Meßinstrument darstellt. Bei geringen Feuchten von 30 % prallen bis 80 % der 0.25 µm Testaerosole von den Sammelstufen ab, bei 60 % immer noch um 30 %. Ungünstige Strömungsverhältnisse auf den hinteren Impaktorstufen verschlechtern die Abscheidequalität, so daß hier etwa 10 % Wandverluste auftreten. Außerdem werden Nebenabscheidungen sichtbar, wodurch die hinteren Impaktorstufen an Trennschärfe verlieren.

Da der Einsatz von Haftmitteln häufig Probleme für die nachfolgende chemische Analyse der Impaktorproben mit sich bringt, kommt eigentlich nur der Betrieb des Impaktors unter kontrollierten Feuchtebedingungen in Frage. Für zukünftige Messungen an "Global Atmosphere Watch" (GAW)-Stationen muß daher ein Konzept entwickelt werden, wie die Probenahme feuchtekontrolliert verbessert werden kann.

## **Abstract**

Impactors offer the opportunity for a size-dependent separation and collection of atmospheric aerosol particles as well as for a chemical analysis of the particle fraction afterwards. Unfortunately, impactors suffer from bounce-off of particles being collected on an impaction stage that is designed to collect smaller particles.

This research deals with collection losses of a Berner low pressure impactor. In cooperation with InAMed GmbH in 82131 Gauting radioactive labelled test aerosols were generated in order to check the collection efficiency of this impactor type under different humidity conditions. The results clearly show, that the impactor being operated without coating impaction substrates with grease or a sticky oil is only a suitable instrument at relative humidity above 60 %. At 30 % humidity about 80 % of the 0.25 µm test aerosol bounced and at 60 % humidity about 30 %. Non ideal streamlines at the backward impaction stages deteriorate the collection efficiency causing wall losses of about 10 %. Additionally depositions have been observed, resulting in a shift of the cutoff curve for small particles.

Because coating may interfere with the chemical analysis of the collected particles it would be advantageous to run the impactor at controlled relative humidity. For future impactor measurements at Global Atmosphere Watch (GAW) stations a concept should be developed how to improve particle collection at controlled relative humidity.

## 1 Einleitung

Das atmosphärische Aerosol umfaßt Partikeln von wenigen Nanometern bis oberhalb von 10 Mikrometern. Noch größere Partikeln sedimentieren auf Grund der Schwerkraft rasch aus. Impaktoren ermöglichen eine größenabhängige Auftrennung und Abscheidung von Aerosolpartikeln, sowie die nachgeschaltete chemische Analyse der Partikelfraktionen.

Impaktoren, die das Aerosol in mehrere Größenklassen auftrennen, werden als Kaskadenimpaktoren bezeichnet. Das Sammeln von Aerosolpartikeln auf Filtern ist ebenfalls üblich, hat aber eine Reihe von Nachteilen:

- Die Trennschärfe eines Filters für zwei Größenklassen ist nicht so groß wie die des Impaktors.
- Im Filter werden die gesammelten Partikeln ständig von Luft umströmt, wodurch nachträgliche Reaktionen möglich sind. Im Impaktor werden die Partikeln auf der Prallfläche abgelagert, wo ein Gasaustausch mit Luftmolekülen wegen der Grenzschichteffekte weniger intensiv ist.
- Während im Filter die Partikeln über die gesamte Filterfläche verteilt werden, konzentriert ein Impaktor das Deponat auf sehr kleiner Fläche.

In der Praxis gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Impaktortypen. Im wesentlichen unterscheidet man die beiden Grundtypen Schlitz- oder Runddüsenimpaktor. Je kleiner die Partikeln sein sollen, die man abscheiden will, desto enger müssen die Düsen sein und desto höher wird die Geschwindigkeit in den Düsen. Bei Impaktordüsen mit einem Durchmesser größer 0.25 mm können bei Atmosphärendruck und inkompressibler Strömung noch Partikeln mit einem minimalen Durchmesser von 0.2 - 0.3  $\mu\text{m}$  impaktiert werden. Will man noch kleinere Partikeln abscheiden, so benötigt man engere Düsen oder einen gewissen Unterdruck. Diese Charakteristiken sind in den sogenannten Niederdruckimpaktoren verwirklicht (BERNER, 1972 und BERNER u.a., 1979). Mit steigendem Unterdruck steigt aber der sogenannte Cunningham'sche Korrekturfaktor, wodurch die Abscheidung zu kleineren Partikeln hin begrenzt wird. Wie später gezeigt wird, stellt dieser Faktor eine Anpassung des Stoke'schen Gesetzes dar, weil dies Gesetz nicht für Partikeln mit einem Durchmesser kleiner etwa 1  $\mu\text{m}$  gilt.

Berner Impaktoren haben eine weite Verbreitung, weil sie eine hohe Auflösung im Submikrometer Bereich liefern und auf Grund ihres relativ hohen Luftdurchsatzes gerade für Hintergrundstationen mit geringen Aerosolkonzentrationen geeignet sind.

Auch am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg wird innerhalb des Global Atmosphere Watch (GAW)-Programms ein 3-stufiger Berner Niederdruck-Impaktor mit Runddü-

sen benutzt. Da es sich bei diesem Impaktortyp um eine Sonderanfertigung mit von uns vorgegebenen Abscheidegrenzen handelt, sind die sogenannten „Cut-Offs“ nur gerechnet, in der Praxis aber noch nicht überprüft worden. Voruntersuchungen hatten weiter gezeigt, daß bei dem Impaktor unter bestimmten Bedingungen (geringe relative Feuchten) Sammelverluste auftreten können.

Folgende Forderungen sind generell an einen Impaktor zu stellen:

- Isokinetisches Sammeln, d.h. Partikeln sollen nicht auf gekrümmten Bahnen in den Impaktor eintreten, um Sammelverluste am Geräteeinlass zu vermeiden.
- Die Partikeln sollen in den Düsen allmählich beschleunigt werden, damit sie am Düsenende die Luftgeschwindigkeit erreichen, um auf Grund ihrer Trägheit abgeschieden zu werden.
- Die Partikeln sollen, sofern sie die erforderliche Trägheit besitzen, um die Abscheidefläche zu erreichen, auch abgeschieden bleiben und nicht wieder abprallen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Prüfung der letzten Forderung.

Um das Haften sicherzustellen, kann die Prallfläche mit einem Haftmittel präpariert werden. Eine nachfolgende chemische Analyse verbietet aber in den meisten Fällen die Verwendung eines Haftmittels. Beim atmosphärischen Aerosol kann man sich jedoch den Effekt zu nutze machen, daß die Partikeln infolge ihrer Hygroskopizität Wasser anlagern. Diese Wasserhülle verstärkt die Adhäsionskräfte erheblich, so daß nur sehr trockene Partikeln von der Sammelfläche wieder abprallen. Ziel muß es daher sein, die Feuchteabhängigkeit der Sammeleffizienz eines Impaktors zu kennen.

Aus diesem Grund soll die nachfolgende Untersuchung potentielle Sammelverluste aufzeigen und veranschaulichen, an welchen Stellen im Impaktor und unter welchen Bedingungen sie auftreten.

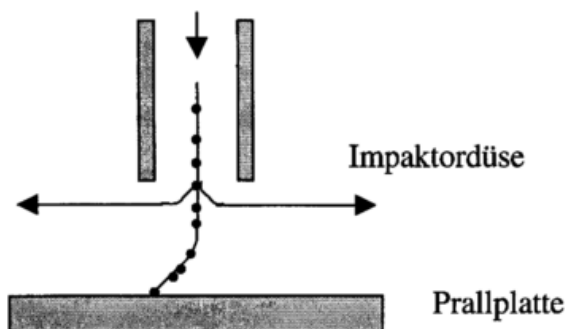
In der Literatur finden sich zwar verschiedene Arbeiten, die sich mit Sammelverlusten von Impaktoren beschäftigen (z.B. WINKLER, 1974; SEO, 1990; STEIN u.a., 1994; MARJAMÄKI u.a., 1998), dieser spezielle Berner Impaktortyp war aber noch nicht genauer untersucht worden. Aus diesem Grund ergab sich die Notwendigkeit, den Impaktor eingehenden Tests zu unterziehen, um den hohen Qualitätsanforderungen nachzukommen, die innerhalb von GAW gefordert werden. Der Test wurde in Zusammenarbeit mit der InAMed GmbH (Institut für Aerosol-Medizin) in 82131 Gauting durchgeführt.

## 2 Impaktor Theorie

### 2.1 Prinzip der Impaktionsabscheidung

Es gibt viele theoretische Arbeiten, die sich mit der Impaktortheorie (z.B. MARPLE und LIU, 1974) oder der Kalibrierung von Impaktoren (z. B. JAENICKE und BLIFFORD, 1974) beschäftigen. Der Vollständigkeit halber werden im folgenden Abschnitt aber noch einmal die wesentlichen Zusammenhänge der Impaktionsabscheidung dargestellt.

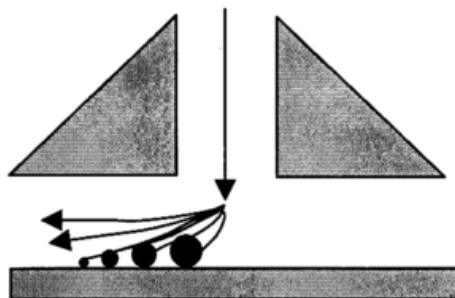
In Impaktoren wird partikelhaltige Luft mit einer genügend hohen Geschwindigkeit durch eine Düse (Schlitz- bzw. Runddüse) bestimmter Weite gegen eine Prallplatte geleitet, die der Düse in einem gewissen Abstand gegenüber steht. In der entstehenden Staupunktströmung werden die Stromlinien der Luft hierbei um  $90^\circ$  umgebogen, wobei Partikeln oberhalb einer bestimmten Größe oder genauer, oberhalb einer Mindestträgheit den Stromlinien aufgrund ihrer Trägheit nicht mehr folgen können und auf der Prallplatte abgeschieden werden. Die Abscheidekurve eines Impaktors wird hauptsächlich durch den Düsendurchmesser bestimmt. Der Abstand zwischen Düse und Prallplatte hat innerhalb bestimmter Grenzen nur unwesentlichen Einfluß auf den Verlauf der Stromlinien. Beim Berner Impaktor wird der Abstand durch einen Distanzring hergestellt.



Partikeln werden mit der höchsten Wahrscheinlichkeit abgeschieden, wenn sie genau in der Mitte der Düse eintreten, weil:

- die Partikeln in der Düsenmitte die größte Geschwindigkeit haben und
- hier die größte Krümmung der Stromlinie auftritt.

Betrachtet man Partikeln verschiedener Größe, so werden sie prinzipiell folgende Bahnen beschreiben:



Ziel einer Theorie zur Abscheidung von Aerosolpartikeln muß daher die Berechnung der Abscheidecharakteristik eines Impaktors sein, oder genauer, die Bestimmung des gesammelten Partikelgrößenspektrums als Funktion von Impaktorgeometrie und Strömungsparametern. Die Lösung hierzu ist die Berechnung der verschiedenen Partikelbahnen.

Die Impaktortheorie, also die Abscheidung von Teilchen aus einem Aerosolstrom aufgrund des Trägheitseffektes, geht von folgenden vereinfachenden Annahmen aus, die Voraussetzung sind, um die Partikelbahnen aus den sehr komplexen Navier-Stoke'schen Gleichungen (nicht lineare partielle Differentialgleichungen) zu bestimmen:

Annahmen:

- Trägheitskräfte sind vernachlässigbar klein im Vergleich zur Viskosität,
- Aerosol besteht aus kugelförmigen Teilchen mit glatter Oberfläche und dem Äquivalenzradius  $r$ ,
- alle Teilchen haben eine einheitliche Materialdichte,
- die Luftgeschwindigkeit zwischen den Teilchen und der umströmenden Luft muß gering gegenüber der Schallgeschwindigkeit sein, damit die Luft als inkompressibel betrachtet werden kann,
- keine Hindernisse wie Wandbegrenzungen oder andere Partikeln in der Umgebung,
- die Reynold'sche Zahl der Luftströmung bei Umströmung der Teilchen ist  $< 1$  (laminar),
- die Teilchen unterliegen keinen Beschleunigungen, ihre Bewegung ist stationär,
- die Düsenströmungen erfüllen gewisse Ähnlichkeitsbedingungen, d.h. relativer Abstand Prallplatte-Düse zur Düsenweite.

Durch diese Annahmen reduzieren sich die Navier-Stoke'schen Gleichungen auf einen Satz von linearen Gleichungen, die einfacher lösbar sind. In der Praxis sind die oben gemachten Annahmen jedoch nicht alle erfüllt. So haben z.B. weder alle Teilchen eine einheitliche Materialdichte noch besitzen sie Kugelgestalt mit glatter Oberfläche, weshalb in der Praxis mit dem Äquivalenzradius (Partikeln mit Einheitsdichte) oder mit einem Formfaktor gearbeitet wird (DAVIES, 1979), der die geometrische Gestalt (Würfel, Zylinder, Partikelcluster etc.) korrigiert. Die Bedingung, daß die Relativgeschwindigkeit klein ist, verglichen mit der Schallgeschwindigkeit, ist für Aerosolpartikeln fast immer erfüllt. Eine wichtige Einschränkung ist die Tatsache, daß die Relativbewegung der Luft an der Teilchenoberfläche gleich Null sein soll, d.h. die Teilchen unterliegen keinen Beschleunigungskräften, sondern folgen dem Luftstrom. Diese Bedingung gilt nicht mehr für kleine Partikeln, deren Größe sich der freien Weglänge des Gases annähert. Diese Partikeln setzten sich schlechter ab als vom Stoke'schen Gesetz beschrieben, weil an der Partikeloberfläche ein sogenannter „slip“ (Schlupf) auftritt. Dieser Fehler tritt signifikant bei Partikeln  $< 1 \mu\text{m}$  Durchmesser in Erscheinung. Zur Kompensation dieses Fehlers führte Cunningham für das Stoke'sche Gesetz einen nach ihm benannten Korrekturfaktor ein. Die „Slip“-Korrektur nimmt mit abnehmendem Druck zu, weil die mittlere freie Weglänge des

Gases größer wird. Diese Tatsache begrenzt den unteren „Cut-Off“ bei Niederdruck-Impaktoren.

## 2.2 Berechnung von Partikelbahnen

Bei der beschleunigten Bewegung einer kugelförmigen Partikel mit der Masse  $m$  und der Beschleunigung  $dv/dt$  wirken in einer rechtwinkligen Strömung folgende Kräfte:

$$m \cdot dv/dt = \text{Summe aller äußeren Kräfte} + \text{Widerstandskraft } F_w \quad (\text{Gleichung für Bewegung einer Partikel})$$

(z.B. Schwerkraft)

Die Schwerkraft ist in diesem Fall vernachlässigbar klein.

Die Widerstandskraft  $F_w$  kann durch das Stoke'sche Gesetz beschrieben werden:

es gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- $Re < 1$  (laminare Luftströmung bei Umströmung der Partikeln),
- inkompressibles Medium,
- unendliche Ausdehnung des Mediums (Kein Wandeinfluß),
- kontinuierliche Bewegung der Partikeln,
- kugelförmige Partikeln,
- kein Schlupf (Knudsenzahl  $Kn < 0.01$ , d.h. Kontinuumsbereich).

$$F_w = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D_p \cdot v}{C}$$

mit:  $\mu$  = Viskosität der Luft in der Düse  
 $D_p$  = Partikeldurchmesser  
 $v$  = Strömungsgeschwindigkeit des Gases  
 $C$  = Cunningham'sche Slip(Gleit)-korrektur, da Konstante im Stoke'schen Gesetz nicht für stark verdünnte Gase gilt =  $1 + (2/D_p)[1.257 + 0.4 \exp(-0.55 D_p/l)]$

Mit der Masse  $m$  der Partikeln:

$$m = \rho_p \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_p^3$$

nimmt die obige Bewegungsgleichung folgende Form an:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = - \frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot C \cdot D_p^2} \cdot (\vec{v} - \vec{u})$$

$u$  = Geschwindigkeit des Gases,  $v$  = Geschwindigkeit der Partikel

Mit der Relaxationszeit  $\tau$  (das ist die von Partikeln benötigte Zeit, um sich der geänderten Strömung anzupassen):

$$\tau = \frac{D_p^2 * \rho_p * C}{18 * \mu}$$

folgt:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\tau} * (\bar{v} - \bar{u})$$

Will man die Bewegungsgleichung auf ähnliche aber unterschiedliche Strömungsvorgänge anwenden (z.B. verschiedene Stufen eines Kaskadenimpaktors mit Düsen unterschiedlicher Abmessungen), so muß sie dimensionslos geschrieben werden. Als Bewegungsgröße wird die mittlere Geschwindigkeit in der Düse  $v_D = u = v$  gewählt.  $D$  ist der Düsendurchmesser. Die dimensionslosen Größen lauten dann:

$$\bar{v}' = \frac{\bar{v}}{v_D} \rightarrow \bar{v} = \bar{v}' * v_D \quad \bar{u}' = \frac{\bar{u}}{u_D} \rightarrow \bar{u} = \bar{u}' * u_D \quad t' = \frac{t * v_D}{D} \rightarrow t = \frac{t' * D}{v_D}$$

eingesetzt in

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\tau} (\bar{v} - \bar{u})$$

folgt:

$$\frac{d(\bar{v}' * v_D)}{d(t' * \frac{D}{v_D})} = -\frac{1}{\tau} v_D (\bar{v}' - \bar{u}')$$

oder

$$\frac{d\bar{v}'}{dt'} = -\frac{D}{\tau * v_D} * (\bar{v}' - \bar{u}')$$

$\tau * v_D$  ist der Bremsweg  $S$  einer Partikel mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_D$ :

$$S = \tau * v_D$$

Der sogenannte Trägheitsparameter  $\Psi$  ist definiert als das Verhältnis von Bremsweg  $S$  einer Partikel zum Düsendurchmesser  $D$ :

$$\Psi = \frac{S}{D} = \frac{D_p^2 * \rho_p * C * v_D}{18 * \mu * D} = \frac{\tau * v_D}{D}$$

In dem sogenannten Trägheitsparameter sind die ortsunabhängigen Variablen zusammengefaßt. Die Trennung der Partikelgrößen erfolgt nach diesem Parameter. Es werden nur Partikeln abgetrennt, deren Trägheitsparameter größer als ein bestimmter kritischer Wert sind. Für verschiedene Partikeln mit gleich großem  $\Psi$  ist in unterschiedlichen Impaktoren die Abscheidewirksamkeit gleich.

Damit lautet die dimensionslose Bewegungsgleichung:

$$\frac{d\bar{v}'}{dt'} = -\frac{1}{\Psi} * (\bar{v}' - \bar{u}')$$

Die Lösung der Gleichung setzt voraus, daß die Teilchen keinen starken Beschleunigungskräften unterliegen, sondern allmählich beschleunigt werden, damit sie dem Luftstrom folgen können.

Stokes hat die Bewegungsgleichung durch Einsetzen von  $D/2$  dimensionslos gemacht. Die Stokes'sche Zahl gibt den Abscheidegrad eines einstufigen Impaktors an und ist folgendermaßen definiert:

$$STK = 2 * \psi = \frac{D_p^2 * \rho_p * C * v_D}{9 * \mu * D}$$

Aus ihr läßt sich z.B. der 50% „Cut-Off“ für einen Impaktor mit vorgegebenen Betriebsdaten berechnen:

$$D_{p_{50}} = \sqrt{STK_{50}} * \sqrt{\frac{9 * \mu * D}{\rho_p * C * v_D}}$$

$\sqrt{STK_{50}} = 0,73$  für unendlich lange Schlitzdüsen,  $\sqrt{STK_{50}} = 0,47$  für Runddüsen  
(HINDS, 1982)

Diese Formel gilt unter folgender Annahme: Die Reynoldszahl der Strömung in der Impaktordüse muß im Bereich  $500 < Re < 3000$  liegen und das Verhältnis des Abstandes Düse-Prallfläche zu Düsendurchmesser muß  $> 1.5$  sein.

### 2.3 Fehlerquellen bei Impaktormessungen

Beim Einsatz von Impaktoren treten unter bestimmten Bedingungen die verschiedensten Fehler in Erscheinung, die eine Messung negativ beeinflussen können.

- Anisokinetik: Partikeln, die auf gekrümmten Bahnen in die Düse eintreten, können entweder nicht in den Impaktor gelangen oder sie werden bereits auf der Düseninnenwand abgeschieden.

- Wandverluste ("wall losses"): Gelangen Partikeln durch Diffusion an Impaktorinnenwände oder werden sie auf gekrümmten Strömungsbahnen infolge ihrer Trägheit im Innern des Impaktors zur Wand transportiert, so entstehen Wandverluste. Sie hängen von der strömungstechnischen Gestaltung des Impaktors und von den Partikeleigenschaften ab.
- Abprallen ("bounce-off"): Berühren die Partikeln die Prallfläche hinter der Düse, bleiben dort aber nicht haften, so spricht man von Abprallen. Sie werden dann mit dem Luftstrom weitergeführt und können zu den Wänden gelangen oder werden auf einer der folgenden Impaktorstufen abgeschieden. Wie erwähnt, kann der Effekt durch Beschichten der Prallfläche mit einem Haftmittel (z.B. Vaseline) unterbunden werden oder im Fall des atmosphärischen Aerosols durch hohe Feuchte mit Bildung einer Wasserhülle auf den Partikeln.
- Abblasen ("blow-off"): Hierbei werden bereits deponierte Partikeln vom Luftstrom hinter der Düse wieder weggeblasen und erst auf einer der folgenden Stufen gesammelt oder an den Gehäusewandungen abgelagert. Der Effekt ist besonders für große Partikeln von Bedeutung.

### 3 Messungen mit dem Berner Niederdruck-Impaktor

Das Global Atmosphere Watch (GAW) Programm der WMO sieht die größenfraktionierte Analyse des Atmosphärischen Aerosols vor. Seit 1997 werden an der GAW-Globalstation Hohenpeißenberg Aerosolproben mit Hilfe eines Berner Niederdruck-Impaktors Modell „LPI 80/0.20/3.11/Filter“ gesammelt. Die Probenahmedauer beträgt bisher 24 Stunden (8:00 h bis 8:00 h des Folgetages), wobei bei einem Durchfluß von  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , geregelt über eine kritische Düse, das Aerosol aus einem Luftvolumen von  $120 \text{ m}^3$  gesammelt wird. In den Impaktorstufen 1-3 wird das Aerosol auf Tedlarfolien abgeschieden, als Backup-Filter dient ein Gelman Teflon-Filter (PTFE), 47 mm Durchmesser mit einer Porengröße von  $2 \text{ }\mu\text{m}$ . Als Gesamtfilter wird ein Gelman Zefluor-Filter (PTFE), 47 mm Durchmesser und einer Porengröße von  $2 \text{ }\mu\text{m}$  benutzt. Der Durchfluß des Gesamtfilters beträgt  $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , was einem Luftvolumen von etwa  $43 \text{ m}^3$  pro Tag entspricht. Eine Befeuchtung findet nicht statt.

Für die nachfolgende chemische Analyse werden die Aerosolpartikeln vom Trägermaterial eluiert. Dazu wird es in ein PE-Gefäß gesteckt und mit 0.5 ml Methanol und 21.5 ml entionisiertem Wasser benetzt. Danach kommt das Gefäß 5 Minuten ins Ultraschallbad. Für die anschließende Analyse der wesentlichen Ionen mit Hilfe der Ionenchromatographie wird die Lösung durch ein Celluloseacetatfilter von 25 mm Durchmesser und  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  Porengröße filtriert.

Als Ionenchromatograph dient ein Gerät der Firma Dionex Modell DX-100 mit Suppression.

Analysiert werden routinemäßig die Ionen Chlorid, Sulfat, Nitrat, Ammonium, Kalium, Calcium und Magnesium. Daneben wird die  $H^+$ -Konzentration und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Durch jährliche Teilnahme des GAW-Labors an internationalen Ringversuchen konnte das hohe Qualitätsniveau der Laboranalysen bestätigt werden (COLEMAN U.A., 2000).

### 3.1 Kenndaten des Berner Impaktors

<i>Modell:</i>	LPI 80/0.20/3.11/Filter
<i>Herstellung, Serie #:</i>	7351 9616 161; 80-30;
<i>Material:</i>	Edelstahl (.4305)
<i>Durchfluß:</i>	83.1 L/min = 4986 L/h = 5 m <sup>3</sup> /h (mit eingelegtem Aerosol Backup-filter), bei 20 °C und Atmosphärendruck.
<i>Druck hinter dem Impaktor:</i>	420 hPa
<i>Foliengröße:</i>	80/40 mm

**Tabelle 1:** Kenndaten des Berner Impaktors

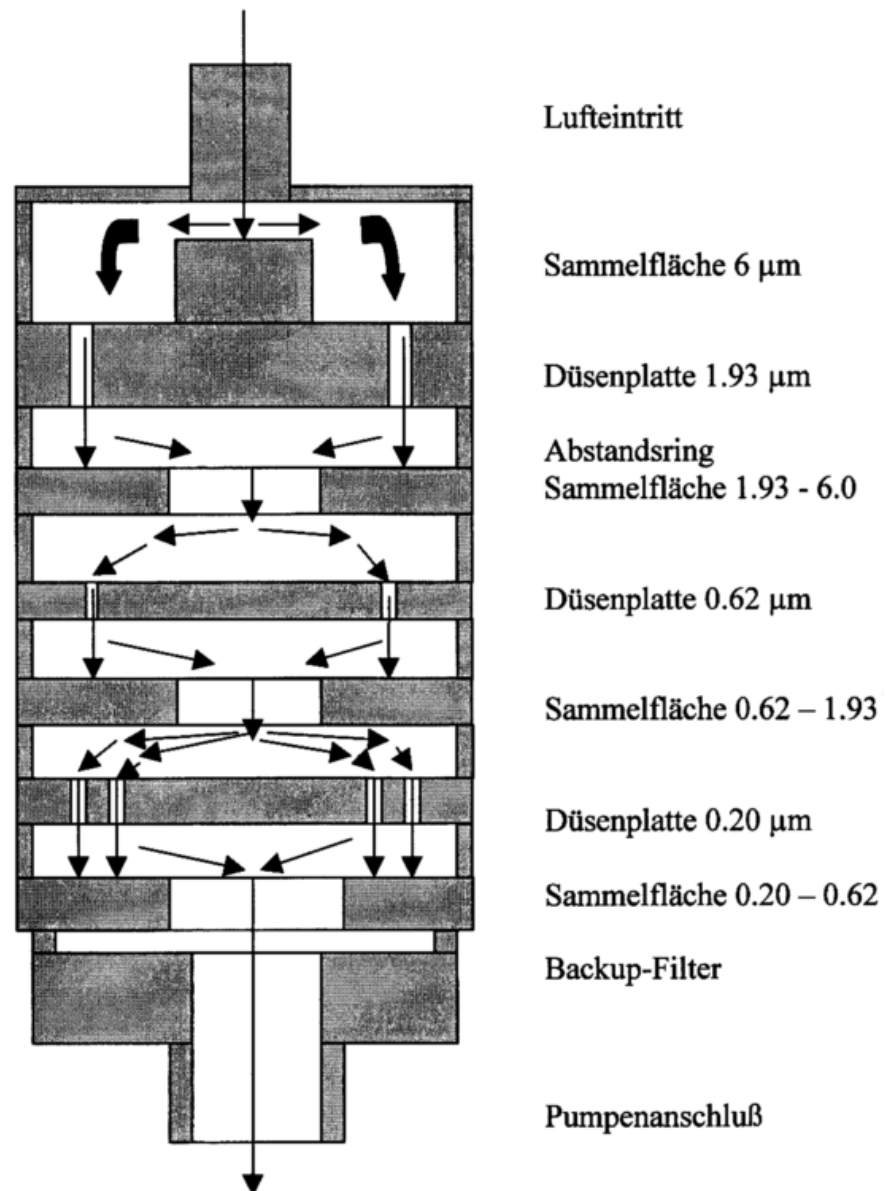
d = Durchmesser

Stufe	cut-off d	Düsen d	Anzahl Düsen	Geschw. in d. Düse	Reynoldszahl
#	µm	mm		m/sec	
4	6.00	11.60	1	13.1	
3	1.93	2.00	21	21.1	2808
2	0.62	0.70	60	60.2	2808
1	0.20	0.25	256	110.6	1843

Anmerkung:  
Die 4. Stufe > 6.0 µm wird nicht ausgewertet, sondern dient nur als Vorabscheider. Hinter der 1. Stufe (0.2 µm) liegt ein Backupfilter (Gelman Teflon-Filter aus PTFE mit einer Porengröße von 2 µm).

Die Tabelle 1 zeigt die Kenndaten des verwendeten Impaktors und aus geometrischen Abmessungen berechnete Größen wie z.B. die Geschwindigkeit in den Düsen, sowie die zugehörigen Reynoldszahlen. Gerade auf den hinteren Impaktorstufen werden die Partikeln nicht allmählich, sondern schlagartig beschleunigt. Die Reynoldszahlen liegen alle in einem unkritischen Bereich.

## Skizze des Berner Impaktors



**Abbildung 1:** Querschnitt des 3-stufigen Berner Impaktors. Der Impaktor besteht aus einer Folge von Düsenplatten mit auf einem Ring angeordneten Düsenbohrungen, einem Distanzring und der Prallplatte. Von der Prallplatte strömt die Luft konzentrisch nach innen durch eine Zentralbohrung in der Prallscheibe und gelangt von dort zum nächsten Düsenkranz. Am Ende sitzt das Backup-Filter.

Erst ab Werten unterhalb von  $Re = 500$  können Probleme erwartet werden (MARPLE und LIU, 1974). Auch die Geschwindigkeiten in den Düsen liegen noch weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit, so daß mit einer Mach Zahl von  $M \leq 0.3$  die Strömung in den Impaktorstufen als inkompressibel angesehen werden kann.

#### **4 Voruntersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Aerosolprobenahme mit Hilfe von Impaktoren**

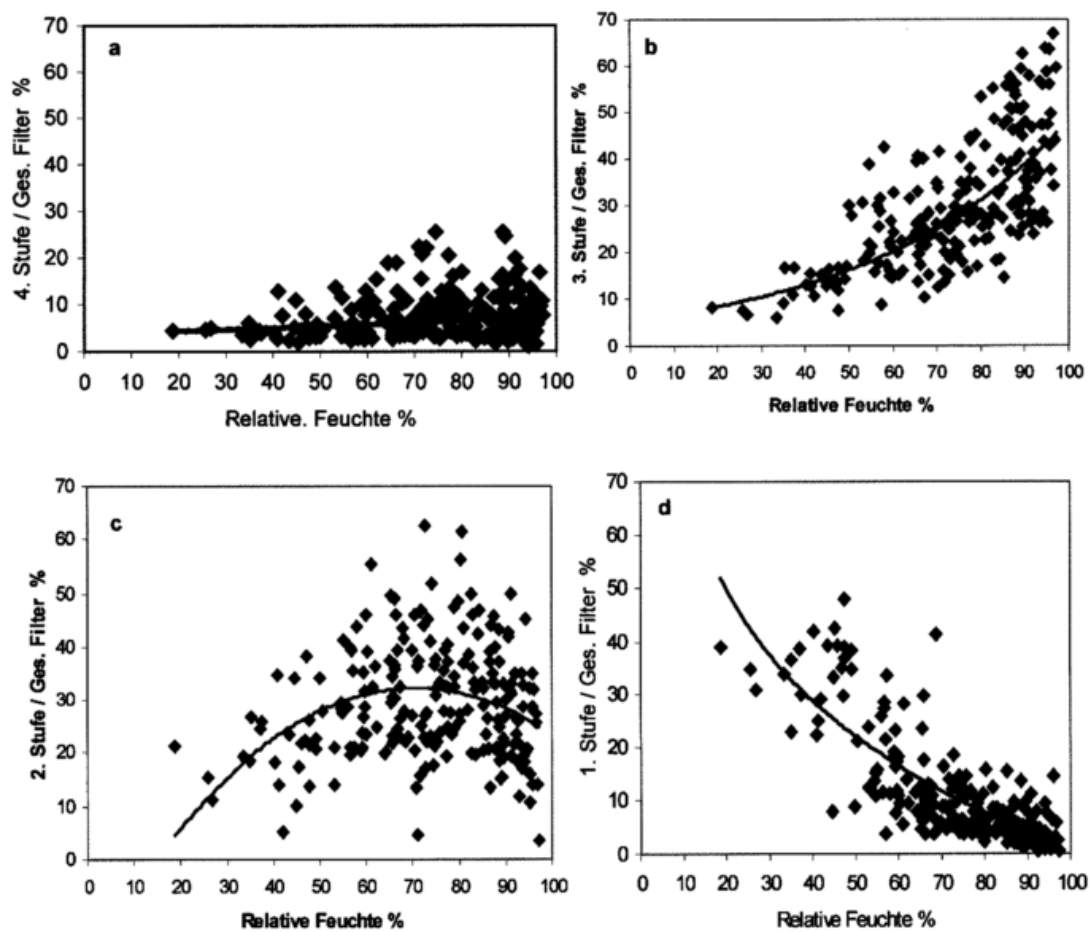
##### **4.1 Berner Niederdruck-Impaktor**

Um zu untersuchen, wie sich die Feuchteabhängigkeit des Abpralleffektes bei der Aerosolprobenahme in den bisherigen Impaktormessungen widerspiegelt, wurde die Summe der analysierten Anionen und Kationen der entsprechenden Impaktorstufe bzw. des „Backup“-Filters ins Verhältnis zur Ionensumme eines parallel gesammelten Gesamtfilters gesetzt und gegen die mittlere relative Feuchte im Sammelzeitraum von jeweils 8:00 h bis 8:00 h des Folgetages aufgetragen (siehe Abb. 2).

In der Stufe  $1.93 - 6.0 \mu\text{m}$  (Abb. 2a) sind nur geringe Abhängigkeiten von der relativen Feuchte festzustellen. In der Stufe  $0.62 - 1.93 \mu\text{m}$  (Abb. 2b) werden bei hohen Feuchten zwischen 30 und 70 % gesammelt, bei geringen Feuchten aber nur noch 20 %. Die Stufe  $0.20-0.62 \mu\text{m}$  (Abb. 2c) zeigt ein ähnliches Bild. Besonders bei geringen Feuchten kleiner 60 % werden sogenannte „Bounce-Off“-Effekte sichtbar. Das bedeutet, daß diese Partikeln nur zu einem geringen Prozentsatz auf der entsprechenden Stufen zurückgehalten werden, da ihnen ein entsprechendes Haftmittel in Form einer Wasserhülle fehlt (WINKLER, 1974); sie prallen ab und sind erst auf dem Backup-Filter wiederzufinden (Abb. 2d). Dieses erste Ergebnis kann nur ein Hinweis für das Ausmaß des Abpralleffektes sein, denn die relative Feuchte ist im Tagesverlauf nicht konstant und der Mittelwert der Feuchte über den Sammelzeitraum ist nur ein grobes Maß. An einer Bergstation wie dem Hohenpeißenberg ist die Tagesvariation der relativen Feuchte in der Regel nicht sehr groß, so daß Abb. 2 ein relativ brauchbares Bild für den Effekt der Feuchte beim Sammeln gibt. Die große Streuung der Meßpunkte wird hauptsächlich durch die Variation der Aerosolgrößenverteilung bestimmt, zu einem gewissen Teil aber auch durch die nicht konstante Feuchte im Tagesverlauf. Die wechselnde Menge unlöslichen Materials, die nicht analysiert wird, trägt ebenfalls zur Streuung bei.

## Feuchteabhängigkeit der Aerosolprobenahme

(Verhältnis der Ionensumme der verschiedenen Impaktorstufen zum Gesamtfilter)



**Abbildung 2:** Impaktor-Messungen aus dem Jahr 1998, Sammeldauer: 8:00 h - 8.00 h des Folgetages. Die relative Feuchte ist der Mittelwert über den Sammelzeitraum.

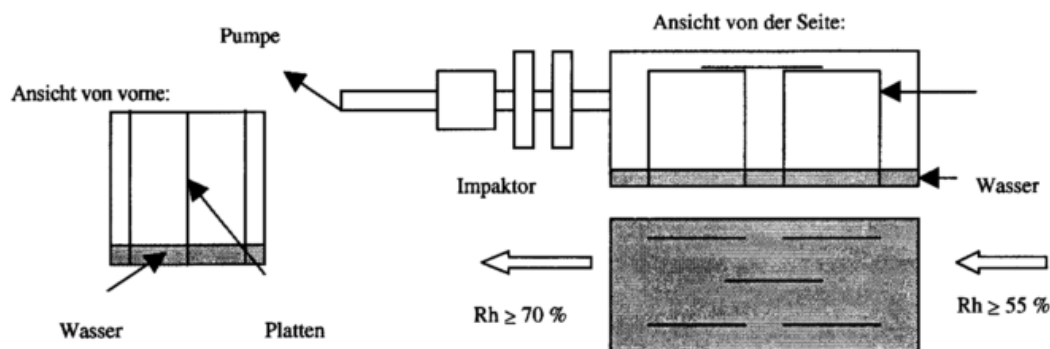
- a 4. Stufe: 1.93 - 6.0  $\mu\text{m}$  Durchmesser
- b 3. Stufe: 0.62- 1.93  $\mu\text{m}$
- c 2. Stufe: 0.20- 0.62  $\mu\text{m}$
- d 1. Stufe: Backup-Filter

## 4.2 Schlitz-Impaktor (Modell Junge)

Parallel zu der Untersuchung des Berner Impaktors wurden Aerosoldaten auf ihre Feuchteabhängigkeit hin untersucht, die von 1990-1993 mit einem 2-stufigen Schlitz-Impaktor am ehemaligen Meteorologischen Observatorium in Hamburg-Sasel gewonnen wurden (KAMINSKI und WINKLER, 1994).

In einem Kaskadenimpaktor (2 Schlitz-Impaktoren in Serie) wurden Große- ( $0.2 < d < 2.0 \mu\text{m}$ ) und Riesenpartikeln ( $d > 2.0 \mu\text{m}$ ) getrennt gesammelt und auf einem nachgeschalteten Filter die Aitkenpartikeln aufgefangen. Ein parallel betriebenes Gesamtfilter diente zur Kontrolle der 3 Fraktionen. Das Aerosol wurde auf PTFE-Filtern gesammelt. Die Impaktorplatten bestanden aus Glas. Ein Haftmittel wurde nicht eingesetzt.

Da verschiedene Arbeiten gezeigt hatten, daß bei geringen Umgebungsfeuchten hohe Sammelverluste und „Bounce-off“-Effekte auftreten können (WINKLER, 1974; STEIN u. a., 1994), wurde bei hoher relativer Feuchte gesammelt, um ein Abprallen der Aerosolpartikeln von der Sammelfläche zu verhindern. Wie bereits erwähnt, besitzen die Partikeln dann eine Wasserhülle, so daß sie gut auf der Sammelfläche haften. Die Sammelluft wurde vor dem Eintritt in den Kaskadenimpaktor durch einen Vorbefeuchter geleitet, der die Feuchte um bis zu 15 % anhob.



**Abbildung 3:** Skizze des Vorbefeuchters

Der Vorbefeuchter bestand aus einem PVC-Kasten, in dem sich unten eine Wanne mit 1–1,5 cm destilliertem Wasser befand. Darin tauchten 5 unglasierte Keramikplatten ein, die das Wasser aufsaugten und feuchte Wandungen mit einer Oberfläche von etwa  $3000 \text{ cm}^2$  bildeten. Bei Umgebungsfeuchten von 55 % wurden dadurch am Impaktoreingang etwa 70 % relative Feuchte erreicht, bei der die Wasserhülle der Partikeln ausreichend dick war, um ein Haften zu ge-

währleisten. Versuche hatten ergeben, daß bei geringen Umgebungsfeuchten ab 55 % die Partikeln wegen der fehlenden Wasserhülle leicht von der Prallfläche abzuprallen beginnen und deshalb auf einer "falschen" Impaktorstufe oder auf dem Filter gesammelt werden. Daher wurde beim Unterschreiten einer Umgebungsfeuchte von 55 % das Sammeln eingestellt.

Die gesammelte Aerosolmenge stammte aus einem Luftvolumen von etwa  $15 \text{ m}^3$ . Die Sammelzeit lag zwischen 7:00 und 14:00 Uhr. Nach dem Sammeln wurden die Proben unmittelbar zur Analyse vorbereitet, indem sie mit 6 ml destilliertem Wasser ausgelaugt wurden. Das hydrophobe Sammelfilter wurde zum Ablösen der Aitkenpartikelfraktion mit 0,5 ml Methanol zunächst benetzbar gemacht, bevor das Auslaugen mit Wasser vorgenommen wurde.

Da nur die Ionen Chlorid, Sulfat, Nitrat, Ammonium und  $\text{H}^+$  analysiert wurden und so keine vollständige Ionenbilanz erstellt werden konnte, wurde die Feuchteabhängigkeit der Sammeleffizienz mit Hilfe der berechneten wasserlöslichen Substanz im Aerosol abgeschätzt. Dieses Verfahren ist zwar weniger genau (s.u.), zeigt aber die Wirksamkeit des Vorbefeuchters.

Die elektrische Leitfähigkeit in wäßriger Lösung, gemessen als reziproker Wert des elektrischen Widerstandes der Lösung, ist als quantitatives Maß für den Gesamtgehalt an Ionen in der Probe anzusehen. Die elektrische Leitfähigkeit wurde bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einer Leitfähigkeitszelle gemessen. Aus der elektrischen Leitfähigkeit wurde die Konzentration wasserlöslicher anorganischer Ionen (kurz LS = lösliche Substanz) berechnet.

Je nach ihrer Beweglichkeit bewirkt jede Ionenart eine ganz spezifische Äquivalentleitfähigkeit, d.h. eine Leitfähigkeit pro Äquivalent gelöste Substanz in einem Kubikzentimeter Lösung. Da die relative Zusammensetzung des Aerosols schwankt, wird eine mittlere spezifische Leitfähigkeit von  $60 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$  und ein mittleres Äquivalentgewicht von 35 g angenommen. Diese Werte entsprechen Lösungsgemischen von  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{Cl}^-$ -Ionen, wie sie im Mittel in natürlichen Aerosolpartikeln vorkommen. Im Einzelfall können zwar Abweichungen von der angenommenen Zusammensetzung auftreten, die Auswirkung auf die so bestimmte LS ist aber nicht sehr groß. Geht man in der Aerosolzusammensetzung einmal von einem kontinentalen und einmal von einem maritimen Aerosol (jeweils gleiche Masse) aus, so ändert sich die spezifische Leitfähigkeit maximal um 10 %. Eine Verschiebung der relativen Anteile der Ionenkonzentration zueinander ändert also die mittlere Äquivalentleitfähigkeit und das mittlere Äquivalentgewicht nur wenig.

Mit den oben gemachten Annahmen ergibt sich die wasserlösliche Substanz (LS) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu:

$$LS = (LF * \ddot{A} * n) / (V * \ddot{A}L).$$

In der Formel haben die Bezeichnungen folgende Bedeutung:

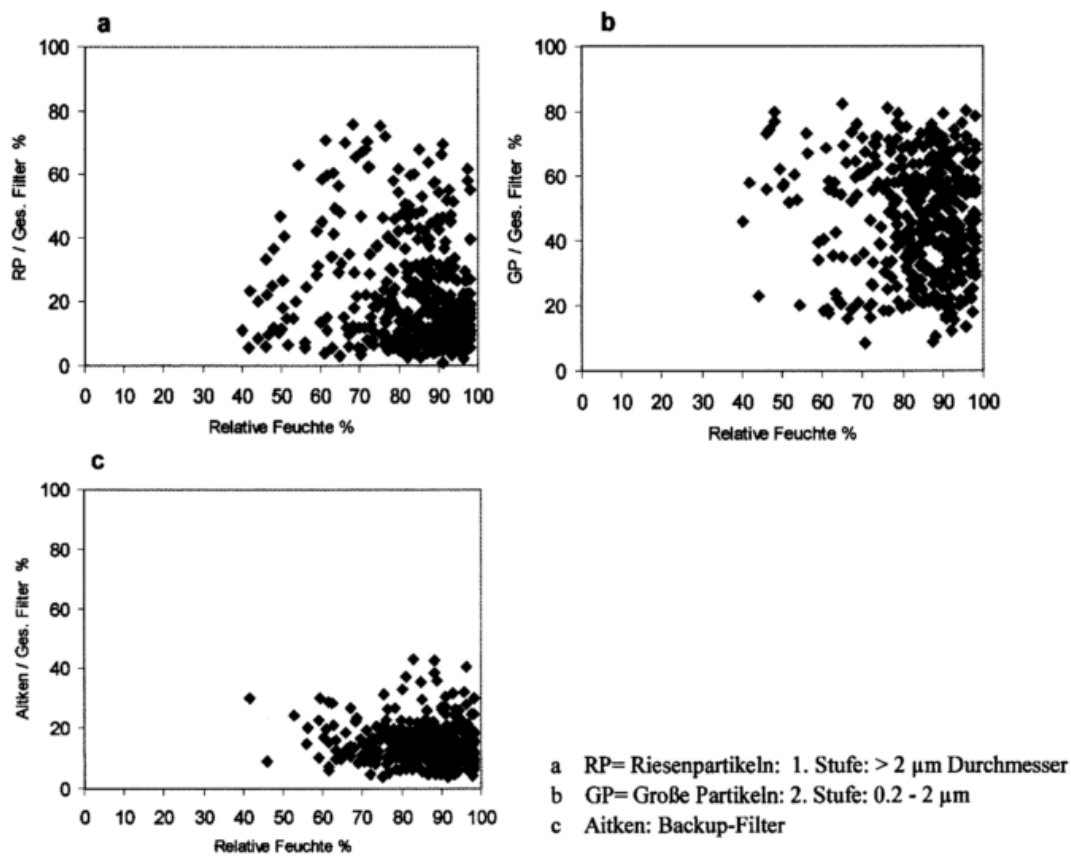
- n : ml Lösungsmittel zum Eluieren der Probe
- V :  $\text{m}^3$  Luftvolumen, aus dem Aerosol gesammelt wurde
- LF : gemessene Leitfähigkeit in der Probe in  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- $\ddot{A}$  : Äquivalentgewicht
- $\ddot{A}L$  : Äquivalentleitfähigkeit

Für die Untersuchung der Feuchteabhängigkeit der Impaktormessungen wurde die wasserlösliche Substanz der entsprechenden Impaktorstufe bzw. des Backup-Filters ins Verhältnis zur wasserlöslichen Substanz des parallel gesammelten Gesamtfilters gesetzt und gegen die mittlere relative Feuchte im Sammelzeitraum aufgetragen (siehe Abb. 4 a - c). Als Qualitätskontrolle wurde die Forderung erhoben, daß die Summe der löslichen Substanzen der Einzelfractionen ( Riesenpartikeln + Große Partikeln + Aitkenpartikeln) nicht größer als die lösliche Substanz eines parallel gesammelten Gesamtfilters sein darf. Wurde diese Bedingung nicht erfüllt, so wurde die Probe verworfen, da der Verdacht nahelag, daß eine Fraktion möglicherweise kontaminiert war.

Die Variabilität der Aerosolgrößenverteilung (maritim - kontinental) sorgt zwar für eine relativ hohe Streuung der Meßwerte, die Auswertung zeigt aber, daß hier auf den ersten Blick keine eindeutigen Feuchteabhängigkeiten zu erkennen sind.

Diese Voruntersuchungen geben somit den Hinweis, daß die Aerosolprobenahme mit Impaktoren ohne Maßnahmen zur Verbesserung der Haftung zu einem beträchtlichen Anteil durch die herrschende Umgebungsfeuchte beeinflusst wird. Um diesen Einfluß genauer zu quantifizieren, wurde der Berner Impaktor mit dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuchsaufbau getestet.

Verhältnis lösliche Substanz (LS) der Impaktorstufe / LS des Gesamtfilters



**Abbildung 4:** Impaktor-Messungen aus den Jahren 1990 - 1993, Sammeldauer: etwa 7:00 h - 15:00 h, Relative Feuchte ist der Mittelwert über die Sammeldauer.

## 5 Test des Berner Impaktors

### 5.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Abpralleffektes als Funktion der Sammelfeuchte wurde eine Versuchsserie mit künstlichen Aerosolen durchgeführt, wozu monodisperse Aerosole mit folgenden aerodynamischen Durchmessern  $d_{ac}$  [in  $\mu\text{m}$ ] hergestellt wurden:

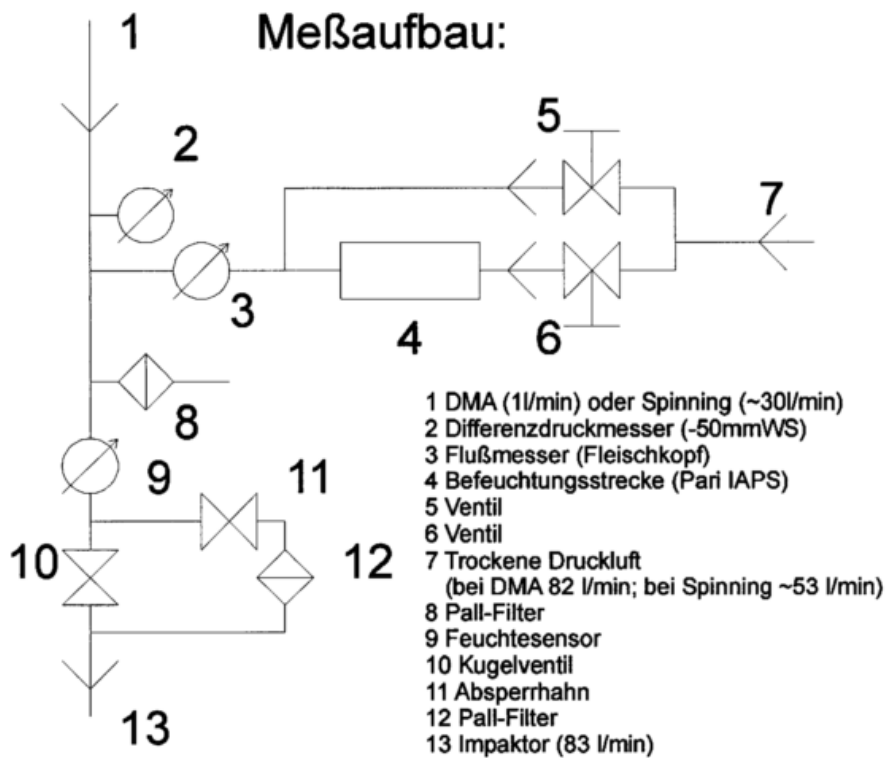
0.25, 0.5, 0.7, 1.5, 1.6, 2.3, 5 und 7.

Die Partikelgrößen wurden derart gewählt, daß sie kurz über bzw. unterhalb der vom Hersteller angegebenen „Cut-Offs“ von 0.2, 0.62, 1.93 und 6  $\mu\text{m}$  der einzelnen Impaktorstufen liegen. Dadurch kann geprüft werden, ob der Impaktor die vorgegebenen Partikelgrößen sau-

ber trennt. Als Partikelmaterial verwendeten wir folgendes Salzgemisch, das in etwa ein Wachstumsverhalten mit der Feuchte ähnlich dem der wasserlöslichen Substanz atmosphärischem Aerosols aufweist (s. Abb. 20):

- 10 % Magnesiumchlorid,
- 30 % Natriumchlorid,
- 40 % Ammoniumsulfat,
- 20 % Ammoniumnitrat.

Die Partikeln enthielten im Gegensatz zum atmosphärischem Aerosol aber keine unlöslichen Bestandteile. Dem Salzgemisch wurde zusätzlich ein geringer Anteil an radioaktivem Technetium-Pertechnetat ( $TcO_4$ ) zugefügt, so daß ein Nachweis der gesammelten Menge nicht durch eine chemische Analyse, sondern durch ein sehr viel empfindlicheres radioaktives Zählverfahren möglich war.

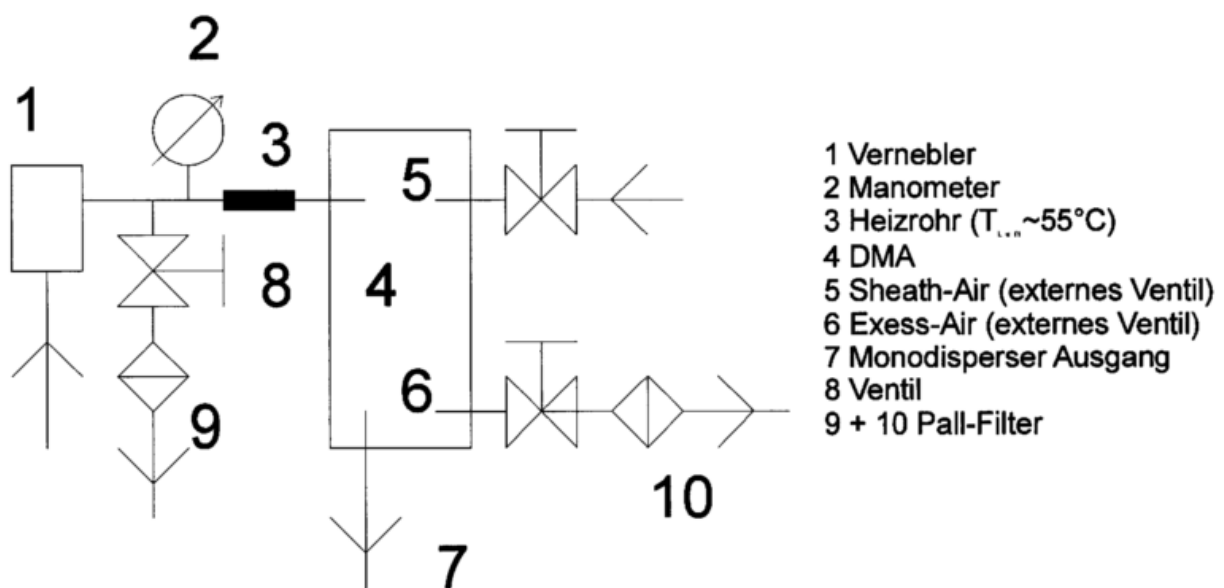


**Abbildung 5:** Versuchsaufbau für den Test des Berner Impaktors

Das Aerosol wurde wahlweise von einem Spinning Top Generator mit ca. 30 l/min. oder einem System Düsenvernebler mit nachgeschaltetem Differential Mobility Analyzer (DMA) zum Aussondern monodisperser Partikeln (Abb. 6) mit einem Durchfluß von ca. 0.5 -1 l/min zur Verfügung gestellt (1). Zu diesem Aerosol wurde dann mittels eines Befeuchtungssystems

(Abb. 5, Nr. 3, 4, 5, 6, 7) Luft hinzugegeben, um die gewünschte relative Feuchte einzustellen. Das Bypasssystem (10, 11, 12) ist dazu da, um den Impaktor (13) während des Einstellens der Feuchte nicht mit Aerosol zu belasten. Die Partikeln von  $d_{ae} = 1.5 - 7 \mu\text{m}$  wurden mit einem Spinning Disk Generator (Bird & Tool Ltd., England) generiert, der direkt monodisperse Partikeln, allerdings mit einer bestimmten Streubreite von 1.06 – 1.12 erzeugt. Die Partikelgröße wurde im trockenen Zustand bestimmt.

Die Partikeln  $d_{ae} = 0.1 - 0.7$  wurden mit einem handelsüblichen Düsenvernebler hergestellt. Aus diesem polydispersen Aerosol wurde mit Hilfe eines DMA's die gewünschte Partikelgröße aus dem Spektrum separiert und zur Messung verwendet.



**Abbildung 6:** Aerosolerzeugung mittels Düsenvernebler/DMA

Mit dem Düsenvernebler (1; Pari IS/2) wurde die radioaktiv markierte Salzlösung vernebelt (Durchfluß 6 l/min). Mit Hilfe eines Ventils (8) läßt sich regeln, wieviel Aerosol in den DMA (4) gelangt (0.5 l/min – 1 l/min). Um das Aerosol zu trocknen, wurde es in einem Heizrohr (3) auf ca. 55 °C erhitzt, die „Sheath-Air“ (5) des DMA reduziert dann die relative Feuchte. Der DMA trennt aus dem polydispersen Teilchenspektrum des Düsenverneblers, durch elektrostatische Separation, eine monodisperse Fraktion heraus. Hierbei wird die Partikelgröße durch Vorgabe einer festen Partikel-Mobilität bestimmt, die aber nur für 1-fach geladene Partikeln gilt. Durch mehrfache Ladungen auf den Teilchen entstehen allerdings bei gleicher Partikel-Mobilität auch Partikeln, die einen größeren Durchmesser besitzen (PUI ET AL., 1979). Dieser versteckte Größenzuwachs ist bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Bei einem Solldurchmesser  $d_{ac} = 0.25 \mu\text{m}$  liegen z.B.:

65.0 %	1-fach geladene,
27.6 %	2-fach geladene (entsprechend $d_{ac} = 0.31 \mu\text{m}$ ) und
6.7 %	3-fach geladene (entsprechend $d_{ac} = 0.36 \mu\text{m}$ ) Teilchen vor.

## 5.2 Visualisierung von Wandverlusten und Fehlabscheidungen im Berner Impaktor

Zur Beurteilung von potentiellen Sammelverlusten im Impaktor ist es sinnvoll, eine Vorstellung der Strömungsverhältnisse im Impaktor zu haben. In einem Schlitz-Impaktor herrschen relativ einfache Strömungsverhältnisse (s. oben), weil in der entstehenden Staupunktströmung die Stromlinien der partikelhaltigen Luft symmetrisch um  $90^\circ$  umgebogen werden. Im Berner Impaktor mit kreisförmig angeordneten Runddüsen (auf den hinteren Stufen sogar in parallelen Reihen) ist der Stromlinienverlauf nicht symmetrisch (s. Impaktorskizze Abb. 1). Um den Strömungsverlauf im Impaktor zu visualisieren, wurde deshalb eine Salzlösung hergestellt, mit welcher der Impaktor besaugt wurde. Die so entstandenen Bilder zeigen Ablagerungen auf den Prallflächen und anderen Teilen des Impaktors. Auf Grund der verwendeten hohen Konzentration dürfen die hellen Ablagerungen auf den Bildern zwar nicht als quantitatives Bild der Sammelverluste gewertet werden, sie geben aber eine annähernde Vorstellung des Strömungsverlaufs und an welchen Stellen im Impaktor je nach Betriebsbedingungen mit Wandverlusten zu rechnen ist.

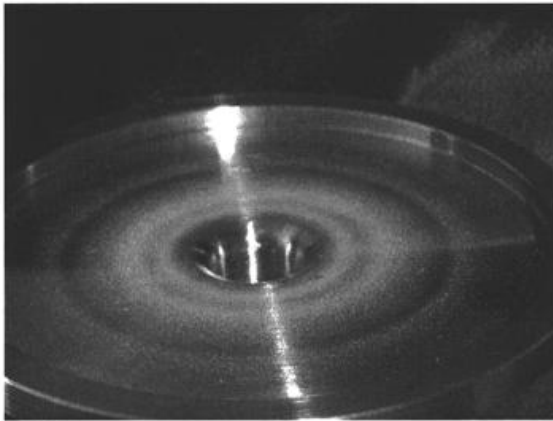
### 5.2.1 Digitale Aufnahmen von Nebenabscheidungen im Impaktor

Aus den Abbildungen 7 a-r ergeben sich drei Bereiche im Impaktor, an denen Verluste auftreten können:

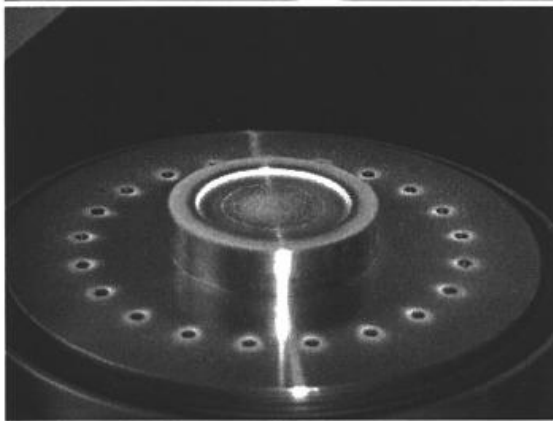
1. Im Bereich der Runddüsen (s. Abb.7: b, c, d, i, j, o, p),

An der Düseneinströmseite scheiden sich Partikeln ab, die wahrscheinlich nicht den Stromlinien folgen (Anisokinetik). Quantitative Auswertungen der Abscheidungen im Bereich der Runddüsen ergeben aber, daß diese Verluste unter 1 % liegen. Erfahrungen aus der täglichen Praxis haben gezeigt, daß sich auch diese geringen Verluste mit der Zeit akkumulieren und die Düsen verstopfen können. Im Feldeinsatz ist es daher ratsam, den Impaktor regelmäßig zu reinigen, um einem Verschließen der Düsen vorzubeugen und um die Trenncharakteristik nicht zu verändern.

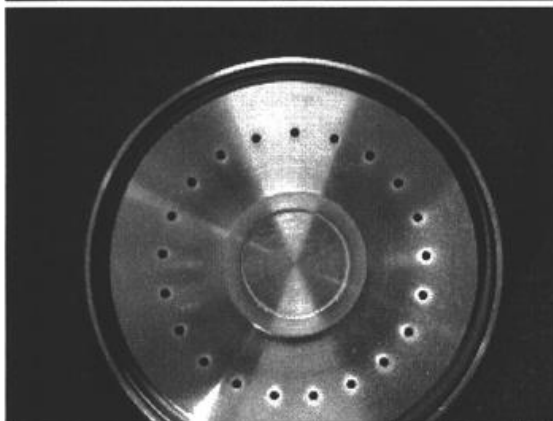
**Abbildung 7 a- r:** Nebenabscheidungen (sichtbar gemacht durch Besaugung mit hohen NaCl Konzentrationen), aus denen z.T. auch die Strömungsverhältnisse abgeleitet werden können.



**a)** Unterseite des Lufteintritts



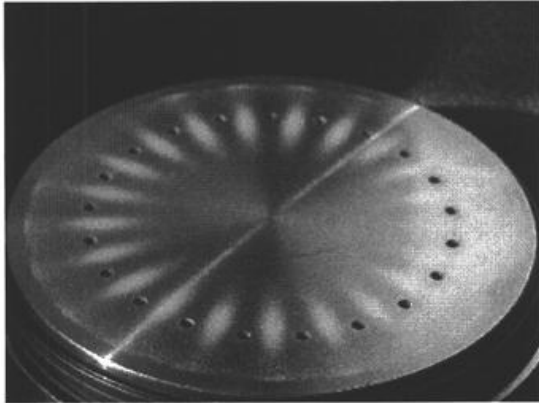
**b)** Vorabscheidefläche  $> 6 \mu\text{m}$  (erhöht) und Impaktordüsen der Stufe  $1.93 \mu\text{m}$  (Einströmseite)



**c)** Gleiches Bild wie b), nur andere Perspektive



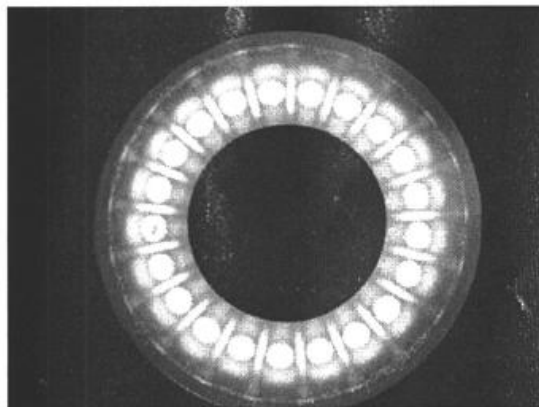
**d)** Vergrößerung von Bild b)



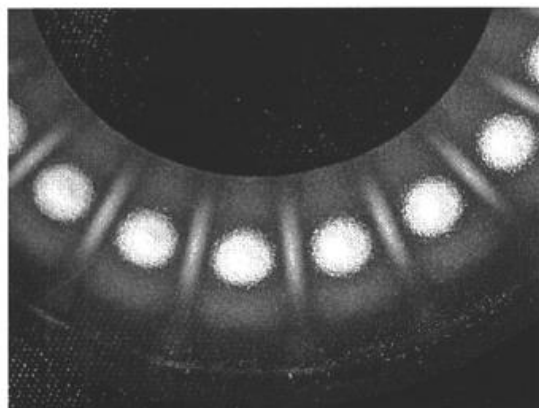
- e) Rückseite der Stufe 1.93  $\mu\text{m}$ :  
Zwischen den Düsen entstehen Abscheidungen, die eventuell durch Wirbel erzeugt werden. Der Sitz des äußeren Abstandsrings ist zu erkennen, da bis zu seinem Rand Abscheidungen auftreten.



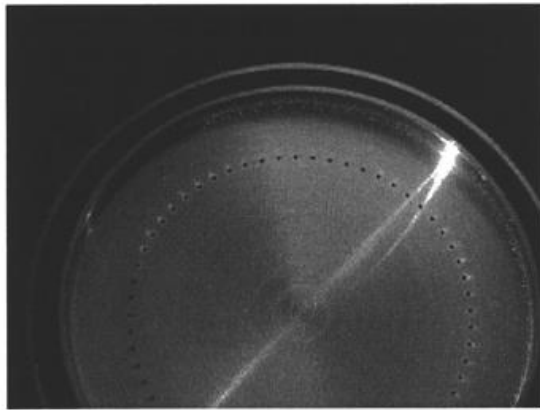
- f) Abstandsring zwischen Düsenplatte der Stufe 1.93  $\mu\text{m}$  und Sammelfläche mit Abscheidungen.



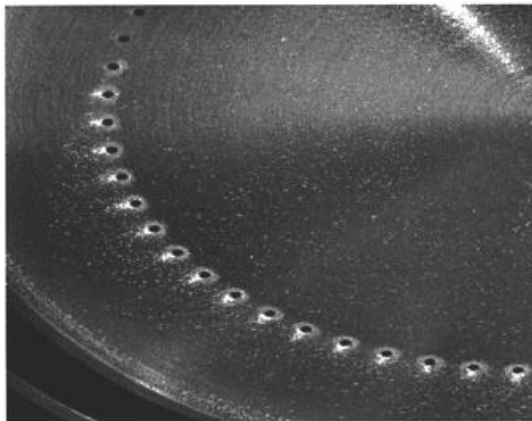
- g) Sammelfläche Stufe 1.93  $\mu\text{m}$ :  
Im Staupunkt der Düsen treten die Sollabscheidungen auf. Dazwischen bilden sich radial angeordnete Streifen.



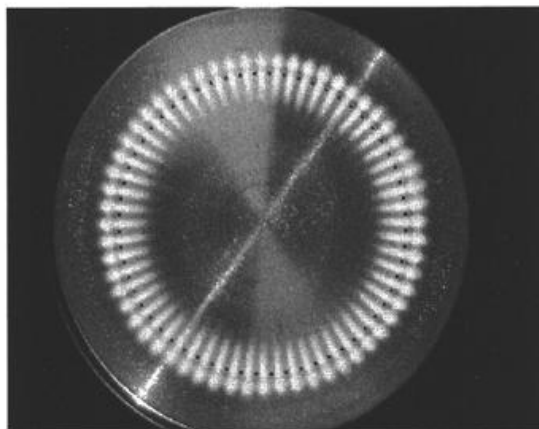
- h) Vergrößerung von Bild g):  
Die Nebenabscheidungen können nur durch zusätzliche Wirbelbildungen zustande kommen.



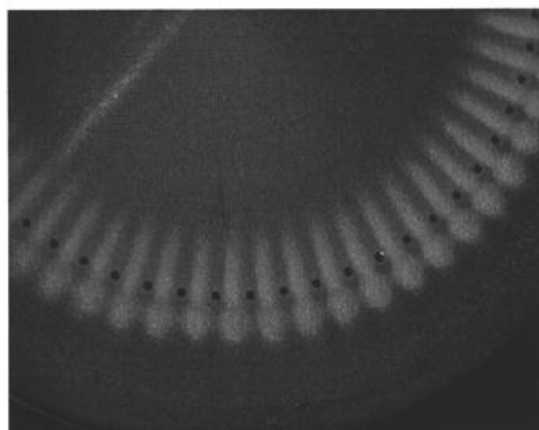
**i)** Impaktordüsen der Stufe 0.62 µm  
(Einströmseite):



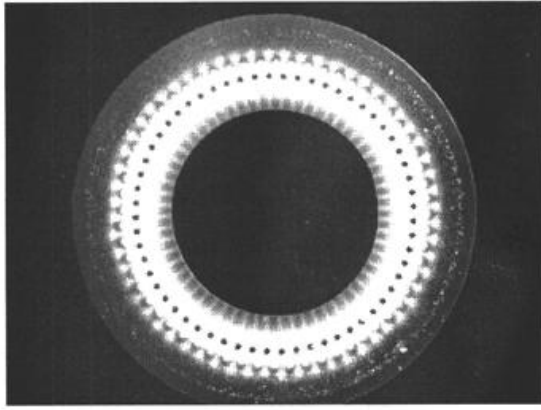
**j)** Vergrößerung von Bild i):  
Es sind besonders radial nach außen verstärkte Abscheidungen zu erkennen, die auf Anisokinetik und plötzliches Beschleunigen zurückzuführen sind, weshalb die Partikeln den gekrümmten Stromlinien nicht mehr folgen können.



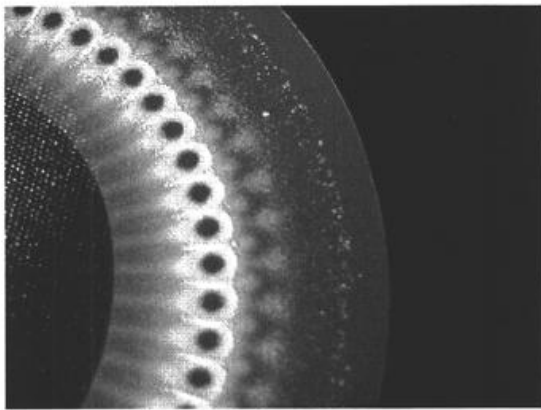
**k)** Rückseite der Stufe 0.62 µm  
(Ausströmseite):  
Wie schon in Bild e, treten zwischen den Düsenauslässen Abscheidungen infolge von Wirbelbildungen auf. Das Erscheinungsbild gegenüber Bild e hat sich aber geändert, da die Abscheidungen radial nach außen gesehen einen "Kopf" aufweisen.



**l)** Vergrößerung von Bild k)



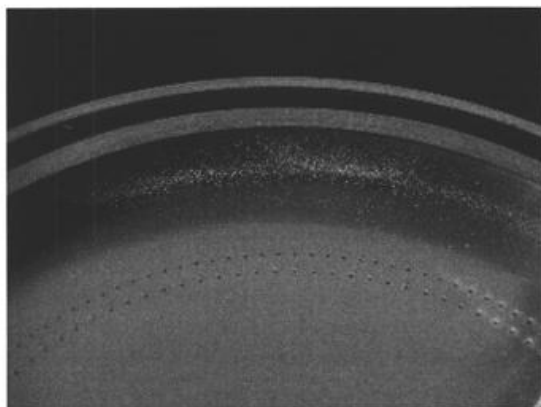
- m) Sammelfläche der Stufe 0.62 µm:**  
 Es ist merkwürdig, daß die Staupunkte hinter der Düse praktisch ohne Deponat sind, während sich zwischen den Staupunkten helle Kränze bilden, in denen verstärkte Ablagerungen entstehen. Radial nach außen bilden sich auch in größerem Abstand noch Ablagerungen und radial nach innen entstehen Ablagerungsstreifen bis zur zentralen Bohrung.



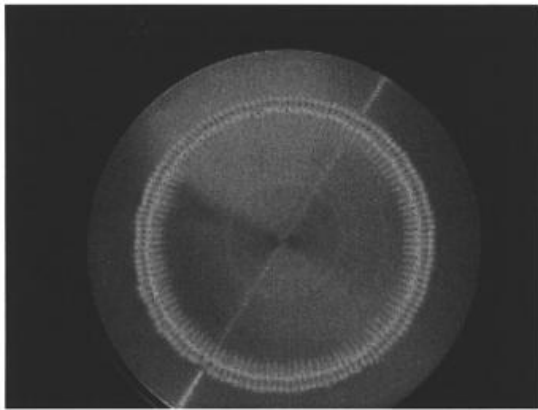
- n) Vergrößerung von Bild m):**  
 Die Depositionen sind Ausdruck einer komplizierten Wirbelströmung.



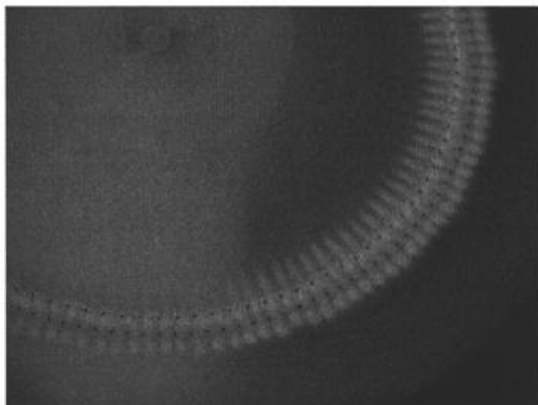
- o) Impaktordüsen der Stufe 0.20 µm (Einströmseite):**  
 Wie bei den größeren Düsen entstehen radial nach außen Ablagerungen infolge anisokinetischer Strömung (gut zu sehen in Bild p, im rechten Teil).



- p) Vergrößerung von Bild o)**



q) Rückseite der Stufe 0.20 µm  
(Ausströmseite):  
Gegenüber Bild k ist die Abscheidung auf der Düsenausströmseite infolge des Düsendoppelkranzes noch komplizierter geworden.



r) Vergrößerung von Bild q)

2. Verluste auf den Rückseiten der Düsenkränze (s. Abb. 7: e, k, l, q, r) und der Innenseite des Distanzringes (s. Abb. 7 f) infolge von Wirbelbildungen um die Staupunkte.
3. Nebenabscheidungen in Form von Linien zwischen den Deponaten (Abb. 7 g, h, m, n) und Ringen (Halos) um die Stellen, an denen das Deponat hätte abgeschieden werden sollen (Abb. 7 m, n). Stattdessen treten schwächere, versetzte Deponate auf, die radial nach außen verschoben sind.

Ähnliche Beobachtungen haben auch WANG und JOHN (1988) beim Test eines 8 stufigen Berner Impaktors mit einem Durchfluß von 30 Liter/Minute gemacht. Bei der Stufe mit 50 Düsen beobachten auch sie Nebenabscheidungen in Form von Linien zwischen den Deponaten und sogenannte Halos von mehreren Durchmessern um die Deponate. Sie führen diese Nebenabscheidungen auf die Stagnationszone zwischen den Düsen zurück und beobachten eine damit verbundene Verschiebung des "Cut-Offs" zu kleineren Durchmessern. Dies hat zur Folge, daß die Abscheidkurve der entsprechenden Impaktorstufe an Steilheit oder besser gesagt an Trennschärfe verliert. Bei auf der Prallfläche gut haftenden Aerosolen beobachteten sie weiter unter jeder Düse ein scharf abgegrenztes Deponat und schwache Nebenstreifen, bei schlechter haftenden Materialien fehlte das Deponat, dafür waren die Nebenstreifen wesent-

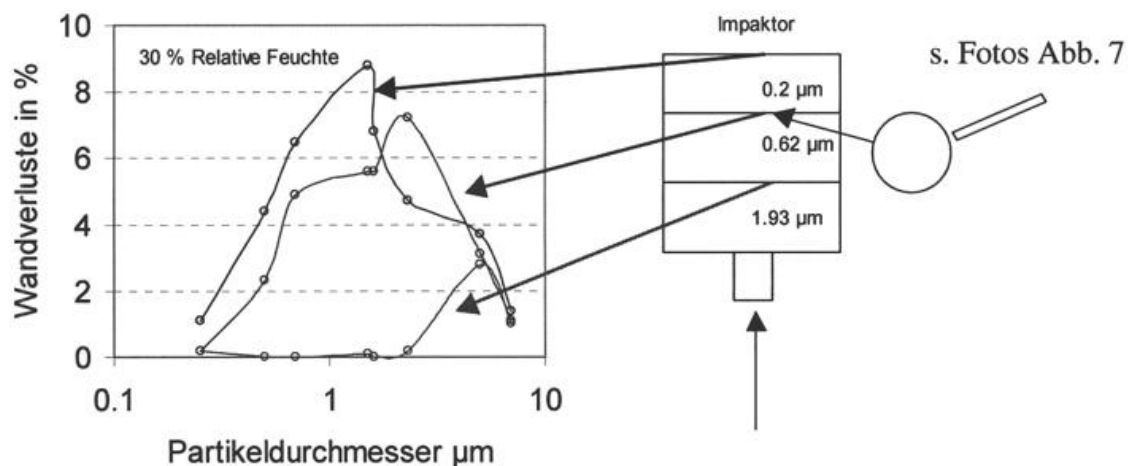
lich dicker. Als Ursache mutmaßen die Autoren die großen Kräfte, die durch die hohen Geschwindigkeit in den Düsen entstehen. Neben den unbekanntenen Einflüssen des komplizierten Strömungsfeldes, führen sie als weiteren Kritikpunkt die nicht idealen Übergänge in die Düseneingänge der Impaktorstufen an.

HILLAMO und KAUPPINEN (1991) stellten bei der Untersuchung eines Berner Impaktors (25-4/0.015) ebenfalls eine Diskrepanz zwischen den vom Hersteller angegebenen "Cut-Offs" für die Stufen kleiner 0,5  $\mu\text{m}$  Durchmesser und denen bei einem Test ermittelten "Cut-Offs" fest. Sie nehmen an, daß diese Differenz durch Interferenzen der Strömung benachbarter Impaktordüsen entsteht und dadurch, daß die Strömung in den engen Düsen nicht als inkompressibel angesehen werden kann.

### 5.3 Quantifizierung der Wandverluste im Berner Impaktor

Zur quantitativen Erfassung der Depositionen an den verschiedenen Impaktorteilen wurde das abgeschiedene Material abgewischt und das Substrat in einem Zählrohr ausgemessen. Die Ergebnisse sind im Anhang im Detail zusammengestellt.

Die durchgeführten Messungen ergeben, daß markante Sammelverluste hauptsächlich bei geringen relativen Feuchten auf den Rückseiten der Düsenkränze auftreten. Wie die Abbildung 8 zeigt, sind die Verluste mit über 8 % auf der letzten Impaktorstufe (0.2  $\mu\text{m}$ ) am größten und außerdem von der Partikelgröße abhängig. Von der vorderen zur hinteren Impaktorstufe verschieben die maximalen Verluste sich zu kleinen Partikeldurchmessern.



**Abbildung 8:** Fehlabscheidungen auf den Rückseiten der 3 Düsenflächen als Funktion des Partikeldurchmessers bei 30 % relativer Feuchte.

Die maximalen Verluste auf der letzten Impaktorstufe hängen sehr wahrscheinlich mit Querströmungen zusammen (FANG u.a., 1991), wie sie besonders bei mehrreihigen Düsenkränzen auftreten. Diese nach außen verlaufenden Querströmungen sind auch in den digitalen Aufnahmen sichtbar (s. Unterseite der Düsenkranzplatten, Distanzring und Sammelfläche). FANG u.a. haben ein empirisches Maß, den sogenannten Querströmungsparameter entwickelt, der angibt, ab wann die Impaktorstufe noch befriedigend arbeitet. Dieser Parameter ist ein Maß für die Abweichung der Düsenströmung, die durch die Querströmung hervorgerufen wird und leitet sich aus geometrischen Größen ab.

Es gilt: 
$$D_n * N / 4 D_c ,$$

wobei:

$D_n$  der Düsendurchmesser,

$N$  die Anzahl der Düsen und

$D_c$  (Düsen-Cluster Durchmesser) der Durchmesser der Fläche ist, auf welche die Düsen verteilt sind.

Wenn dieser Wert kleiner als ein empirisch ermittelter Wert von 1.2 ist, so arbeitet der Impaktor zufriedenstellend. Für den Berner Impaktor berechnet sich der Querströmungsparameter zu einem Wert von 2.67. Dies und "Bounce-Off"-Effekte sind möglicherweise die Ursache dafür, daß im Staupunkt von der zweiten Impaktorstufe keine Deposition stattfand.

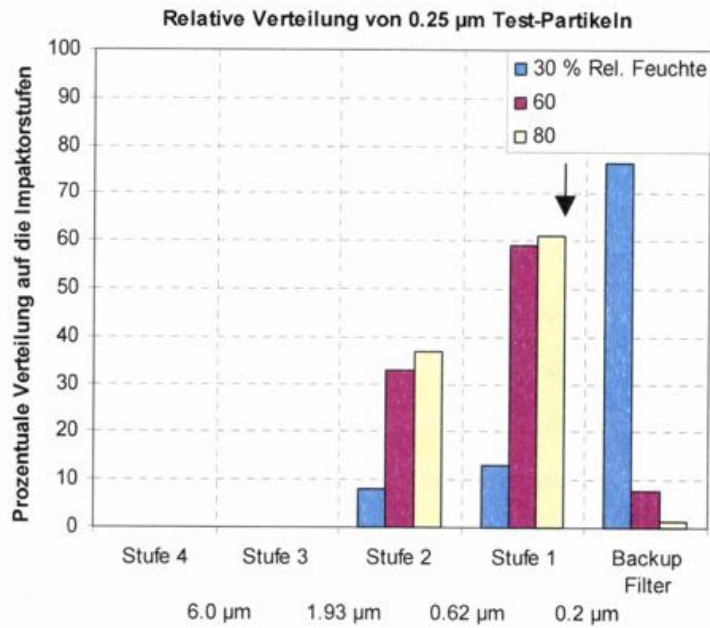
#### **5.4 Untersuchungen zum Einfluß der Feuchte auf den „Bouncing“-Effekt**

In der Literatur finden sich einige wenige Arbeiten, die sich mit dem Einfluß der relativen Feuchte auf das Abscheideverhalten von Aerosolpartikeln beschäftigen. Ein ansonsten sehr gründlicher Artikel, der sich mit der Handhabung eines 6-stufigen Berner Niederdruck-Impaktors beschäftigt (HILLAMO und KAUPPINEN, 1991), weist zwar darauf hin, daß die Sammeleffizienz bei geringen Feuchten sehr klein sein kann, gibt aber keine konkreten Zahlen an. Der Hersteller des Impaktors schätzt die Sammelverluste bei geringen Feuchten auf etwa 50 % (BERNER, 1999). Andere Arbeiten kommen alle gemeinsam zu dem Ergebnis, daß der „Bounce-Off“ erst ab einer bestimmten relativen Feuchte auftritt: z.B. bei Werten unter 60-70 % (STEIN u.a., 1994). STEIN zeigt, daß für atmosphärische Aerosolpartikeln mit 0.25 µm Durchmesser die Verluste durch „Bounce-Off“ bei 60 % relativer Feuchte (RF) zwischen 0 und 26 % liegen, bei 30 % RF um 40 % und daß unterhalb 15 % RF fast alle

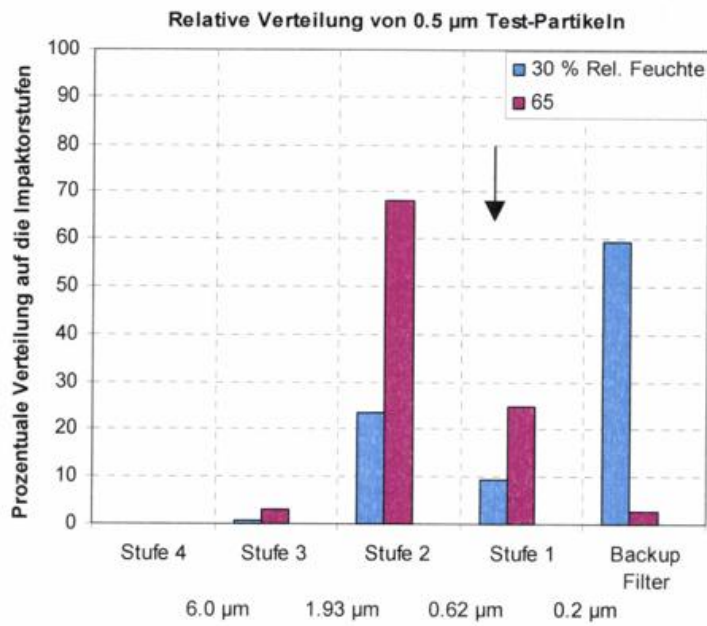
Partikeln (84 – 100 %) verloren gehen. Oberhalb von 80 % RF treten kaum Verluste auf (1 - 9 %).

Um den Feuchteinfluß auf den „Bounce-Off“ des an der GAW-Station benutzten Berner Impaktors zu charakterisieren bzw. zu quantifizieren, wurde mit dem Impaktor das oben beschriebene Testaerosol einmal bei trockenen Bedingungen (RF ca. 30 %) und einmal bei feuchten Bedingungen (RF zwischen 60 und 80 %) gesammelt. Es wurden dann alle Flächen des Impaktors und die Abscheidungen auf den Sammelstufen und dem Backup-Filter ausgemessen, um die Verluste und den „Rebound“-Effekt im Impaktor zu bestimmen. Dazu wurden die Flächen sorgfältig mit einem feuchten Tuch abgewischt und die Konzentration der aufgewischten radioaktiven Strahlung in einer Zählkammer bestimmt.

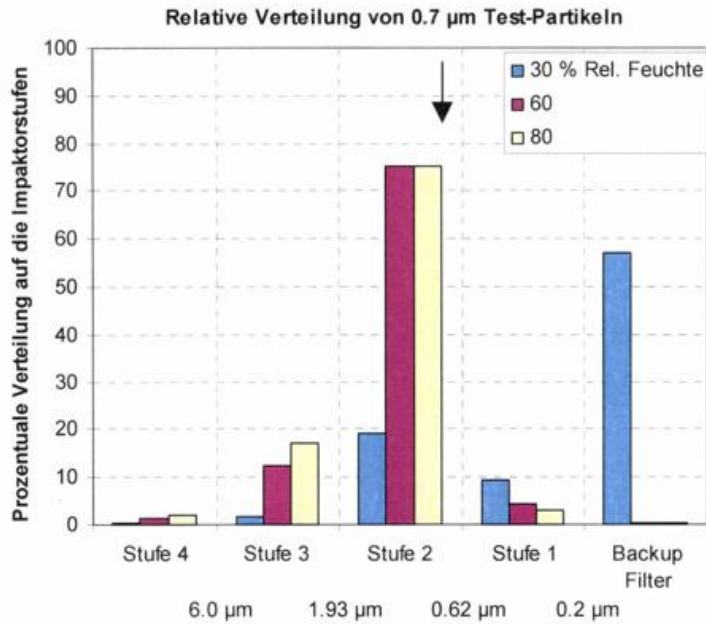
Die Abbildungen 9 bis 16 zeigen die relative Verteilung des Testaerosols auf die einzelnen Impaktorstufen. Markante Abweichungen treten wieder bei geringen relativen Feuchten von 30 % auf. Die Abbildung 17 zeigt den auf dem Backup-Filter abgeschiedenen Aerosolanteil als Funktion des Partikeldurchmessers für 30 und 60 % RF. Bei 60 % RH wird fast unabhängig vom Partikeldurchmesser auf dem Backup-Filter ein Aerosolanteil unter 10 % abgeschieden, was in etwa dem Masseanteil dieser Partikelfraktion entspricht. Bei 30 % RF finden sich je nach Partikeldurchmesser zwischen 10 % (große Partikeln) und 80 % (kleine Partikeln) der Aerosolfraktion auf dem Backup-Filter wieder. Sogar Partikeln mit 5 µm Durchmesser, die eigentlich auf der vorderen Impaktorstufe gesammelt werden sollten, prallen auf dieser und weiteren Stufen ab und werden zu 25 % auf dem Backup-Filter gesammelt. Hieraus wird sehr deutlich, daß bei geringen Feuchten der Impaktor (ohne Verwendung eines Haftmittels) mit Fehlern bei der größtenfraktionierten Aerosolprobenahme behaftet ist.



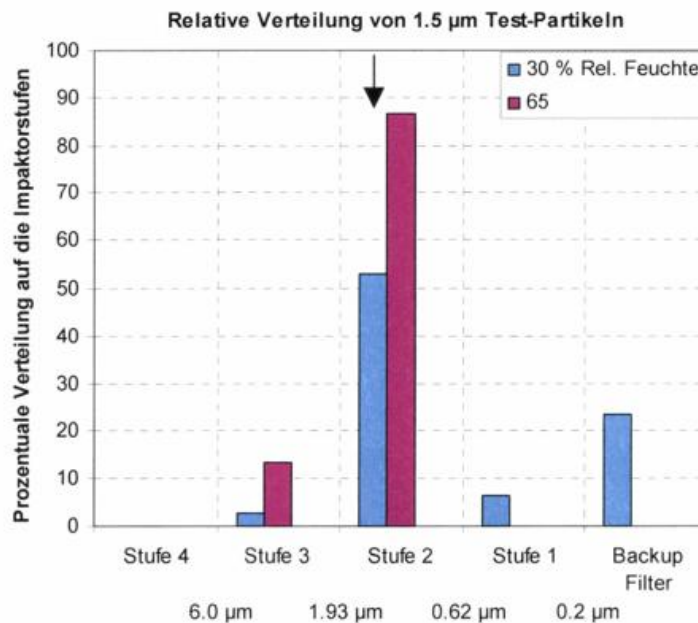
**Abbildung 9:** Prozentuale Verteilung von 0.25 µm Testaerosol auf den Berner Impaktorstufen bei 30, 60 und 80 % relativer Feuchte. Der senkrechte Pfeil gibt die Sollstufe an.



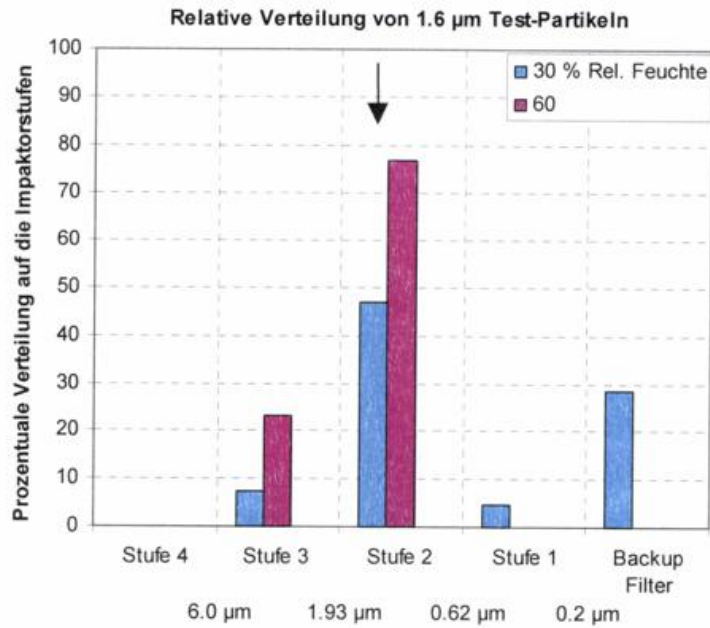
**Abbildung 10:** Prozentuale Verteilung von 0.5 µm Testaerosol auf den Berner Impaktorstufen bei 30 und 65 % relativer Feuchte.



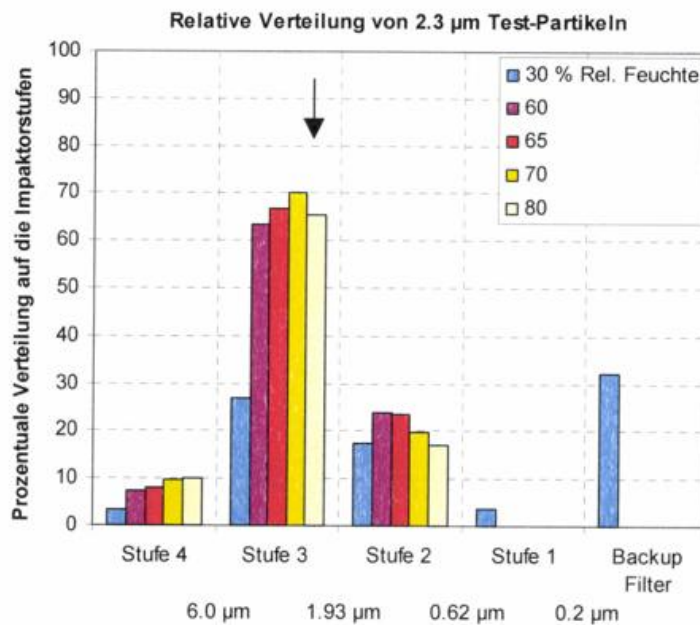
**Abbildung 11:** Prozentuale Verteilung von 0.7  $\mu\text{m}$  Testaerosol auf den Berner Impaktorstufen bei 30, 60 und 80 % relativer Feuchte.



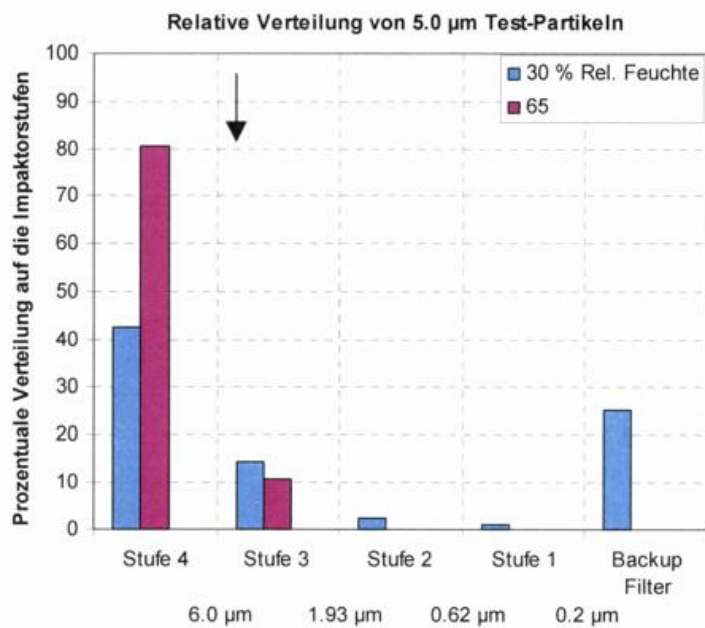
**Abbildung 12:** Prozentuale Verteilung von 1.5  $\mu\text{m}$  Testaerosol (Standard Deviation (SD) = 1.11) auf den Berner Impaktorstufen bei 30 und 65 % relativer Feuchte.



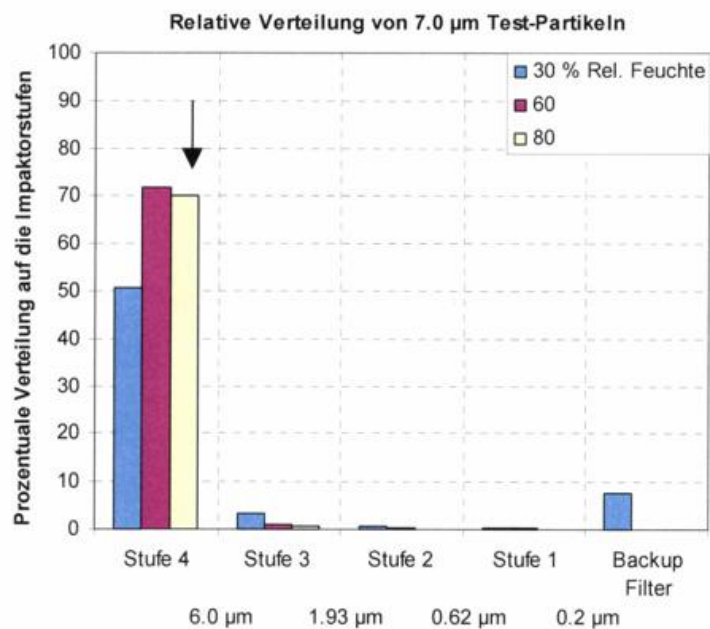
**Abbildung 13:** Prozentuale Verteilung von 1.6 µm Testaerosol (SD = 1.13) auf den Berner Impaktorstufen bei 30 und 60 % relativer Feuchte.



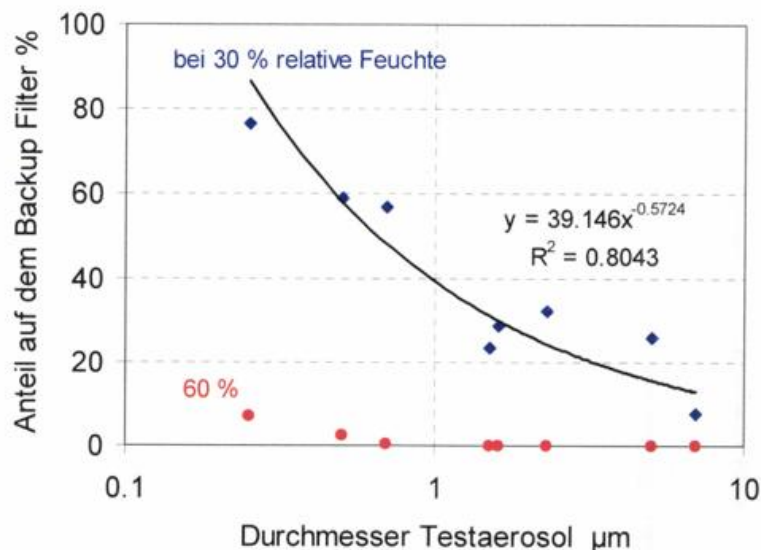
**Abbildung 14:** Prozentuale Verteilung von 2.3 µm Testaerosol (SD = 1.07) auf den Berner Impaktorstufen bei 30, 60, 65, 70 und 80 % relativer Feuchte.



**Abbildung 15:** Prozentuale Verteilung von 5.0  $\mu\text{m}$  Testaerosol ( $SD = 1.07$ ) auf den Berner Impaktorstufen bei 30 und 65 % relativer Feuchte.



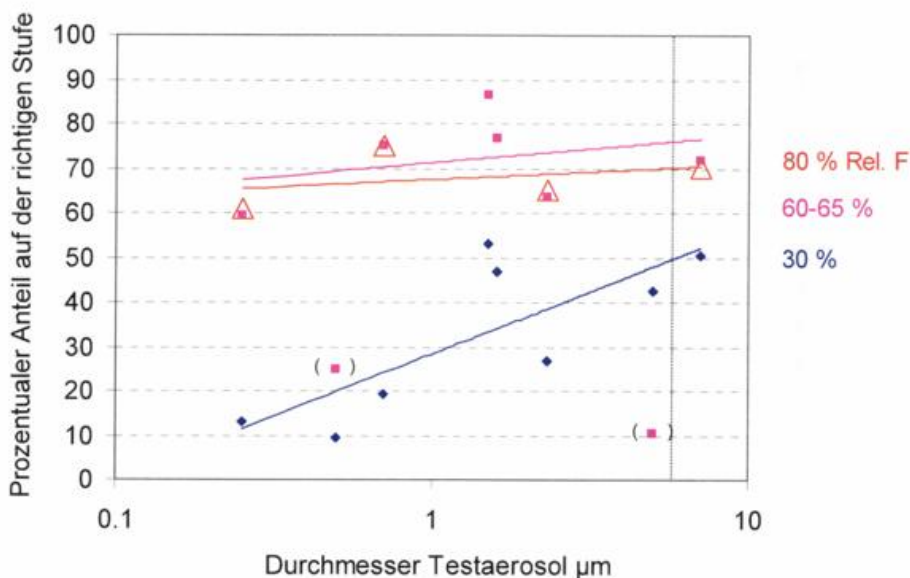
**Abbildung 16:** Prozentuale Verteilung von 7.0  $\mu\text{m}$  Testaerosol ( $SD = 1.06$ ) auf den Berner Impaktorstufen bei 30, 60 und 80 % relativer Feuchte.



**Abbildung 17:** Prozentualer Anteil des Testaerosols, der auf dem Backup-Filter gefunden wird als Funktion des Partikeldurchmessers für 30 und 60 % Relative Feuchte.

### 5.5 Untersuchungen zur Größenselektion des Berner-Impaktors

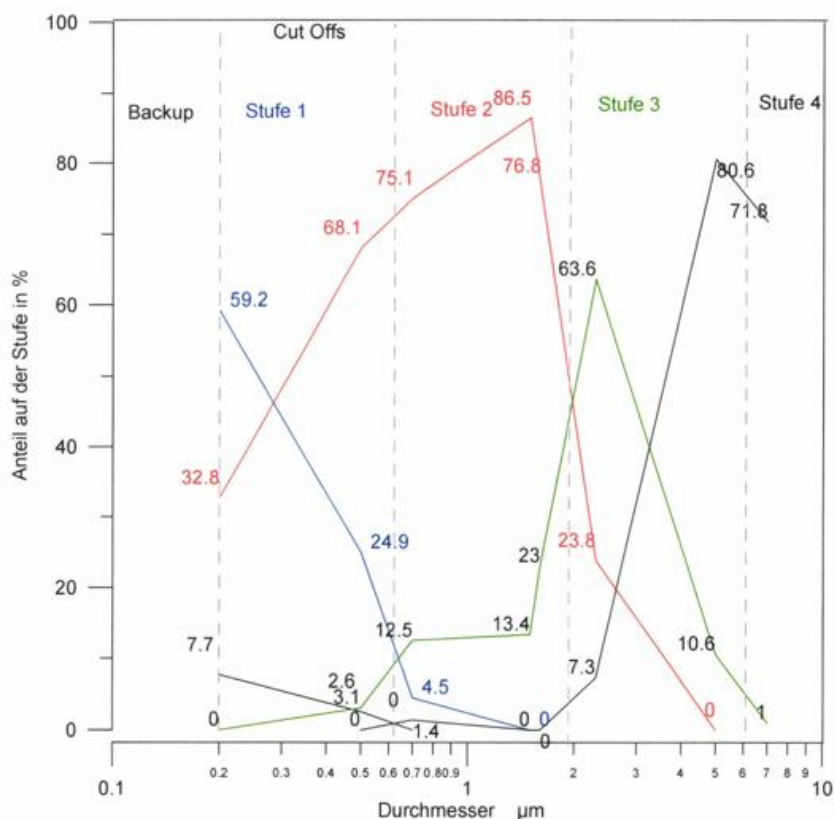
Die schlechte Eignung des Impaktors bei geringen Feuchten zeigt auch die Abbildung 18, die als Funktion des Partikeldurchmessers für drei verschiedene Feuchten darstellt, welcher Anteil des künstlich erzeugten Testaerosols auf der richtigen Impaktorstufe gesammelt wird.



**Abbildung 18:** Anteil des Testaerosols, das auf der richtigen Impaktorstufe wiedergefunden wurde als Funktion des Partikeldurchmessers für 30, 60-65 und 80 % relative Feuchte.

Während bei 30 % RF, abhängig von der Partikelgröße, nur 10 bis etwa 40 % auf der richtigen Stufe gesammelt werden, finden sich bei RF ab 60 % immerhin um 70 % des Testaerosols auf der richtigen Impaktorstufe. Ob die eingeklammerten Meßwerte real sind (nur 24.9 % des 0.5 µm Testaerosols werden bei 65 % RF auf der richtigen Stufe abgeschieden, 68.1 % auf der Stufe davor und ebenfalls nur 10.6 % des 5 µm Testaerosols auf der richtigen Stufe und 80.6 % auf der Stufe davor), sollen die nachfolgenden Überlegungen zeigen.

Die Abbildung 19 zeigt noch einmal die gesammelten Anteile auf den einzelnen Impaktorstufen bei 60 – 65 % relativer Feuchte und gibt damit einen groben Überblick über das Abscheideverhalten des Berner Niederdruck-Impaktors. Die gestrichelten senkrechten Linien geben die vom Hersteller angegebenen „Cut-Offs“ an.



**Abbildung 19:** Prozentuale Anteile der Testaerosole auf den einzelnen Impaktorstufen bei 60 – 65 % relativer Feuchte.

Besonders auffällig ist in der Abbildung 19 die recht geringe Sammeleffizienz von 60 - 80 %, die Abscheidung in der falschen „Cut-Off“-Klasse, und die z.T. sehr breite Abscheidekurve. Diese Punkte können mehrere Ursachen haben, die näher untersucht werden müssen:

- Falsche Größenselektion des Testaerosols infolge von Mehrfachladungen auf den Partikeln und Mono- bzw. Polydispersität,
- Feuchtequellung der Partikeln,

- c) Koagulation von Partikeln  $< 1 \mu\text{m}$ ,
- c) „Bounce-Off“- Effekte.

Ob die Abscheidung der Testaerosole auf den verschiedenen Stufen vernünftig ist, kann also erst beurteilt werden, nachdem diese Einflüsse korrigiert sind.

## 6 Diskussion und Korrektur der Meßwerte

### a) Monodispersität des Testaerosols

Wie in der Versuchsbeschreibung erwähnt, können durch Mehrfachladungen auf den Partikeln bis  $0.7 \mu\text{m}$ , die mit dem DMA separiert wurden, meßtechnisch bedingt, Partikeln mit größerem Durchmesser durchgelassen werden.

Verwendet man die Angaben von Hinds (Tabelle 2) über das Vorhandensein von Mehrfachladungen auf Partikeln in Abhängigkeit von der Partikelgröße (HINDS, 1982), so zeigt sich, daß bei einer Partikelgröße von  $0.5 \mu\text{m}$  nur 42 % des Aerosolkollektivs 1-fach geladen ist, aber bereits 58 % mehrfache Ladungen enthalten und somit einen Partikeldurchmesser größer  $0.62 \mu\text{m}$  besitzt, d.h. etwa 42 % der 1-fach geladenen Partikeln müßten auf der Stufe  $0.2 - 0.62 \mu\text{m}$  abgeschieden werden und der überwiegende Teil auf der davor liegenden Stufe  $0.62 - 1.93 \mu\text{m}$ . Dieser theoretische Wert stimmt auch schon besser mit der Beobachtung überein. Die Verschiebung der Abscheidung des  $0.5 \mu\text{m}$  Testaerosols (s. Abb. 10) ist also kein Sammelfehler des Impaktors, sondern hat seine Ursache in Mehrfachladungen auf den Aerosolpartikeln, wodurch größere Partikeln entstehen.

	<b>0.2 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>1.0 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2.0 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>1-fach Ladung</b>	64.9	42.0	29.3	20.5
<b>2-fach Ladung</b>	27.6	29.9	24.7	18.8
<b>3-fach Ladung</b>	6.6	16.8	18.7	16.3
<b>&gt; 3-fach Ladung</b>	0.9	11.4	27.3	44.4
<b>Summe 2-fach bis &gt; 3-fach</b>	35.1	58.0	70.7	79.5

**Tabelle 2:** Boltzmann-Verteilung in Prozent von elektrischen Ladungen auf Aerosolpartikeln in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser nach Hinds, 1982.

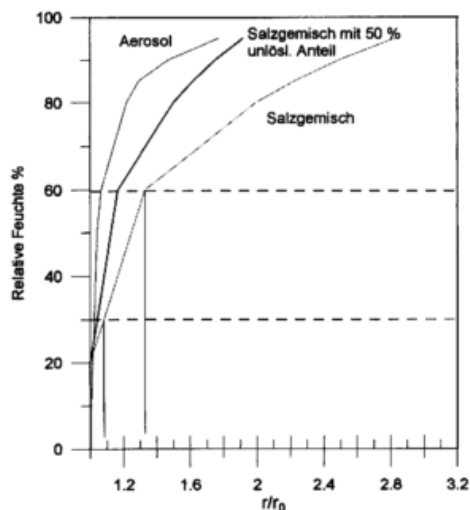
Insgesamt zeigen die Tabelle 2 und die Abbildung 21, daß die Mehrfachladungen mit dem Partikeldurchmesser zunehmen und ab ungefähr  $0.4 \mu\text{m}$  überwiegen.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Größenverteilung des erzeugten Testaerosols. Die Partikeln von  $0.25$  bis  $0.7 \mu\text{m}$  werden mit Hilfe des DMA's zwar als monodisperses Aerosol erzeugt, durch das Vorhandensein von Mehrfachladungen auf den Partikeln entsteht aber ein „quasi-polydisperses“ Aerosol, da verschiedene Aerosolgrößen parallel nebeneinander bestehen. Die Partikeln von  $1.5$  bis  $7 \mu\text{m}$ , die mit dem Spinning Disk Generator erzeugt wurden, können nur mit einer gewissen Streubreite ( $1.06 - 1.12$ ) generiert werden, sind also polydispers verteilt und sollten daher, je nach Streubreite, auch auf mehreren Impaktorstufen abgeschieden werden.

### b) Feuchtequellung der Partikeln

Aerosolpartikeln ändern ihre Größe mit der relativen Feuchte, indem sie gemäß dem Raoult'schen Gesetz Wasser aufnehmen oder abgeben. Die Wasseraufnahme geschieht durch die Verflüssigung von löslichen Salzen in Gegenwart von Wasserdampf mit ausreichend hohem Dampfdruck (WINKLER, 1988).

Die hygroscopischen Testpartikeln können daher durch Feuchtequellung in einen Durchmesserbereich wachsen, der dann auf der davor liegenden Stufe abgeschieden wird. Die Wachstumskurven, d.h. genauer gesagt der Radiuszuwachs  $r/r_0$  als Funktion der relativen



**Abbildung 20:** Wachstumskurven für atmosphärisches Aerosol und verschiedene Salzgemische als Funktion der relativen Feuchte.

Feuchte ist in der Abbildung 20 für ein mittleres atmosphärisches Aerosol, das verwendete Salzgemisch und ein Salzgemisch mit 50 % unlöslichem Anteil dargestellt. Für das

Salzgemisch wachsen die Partikeln bei einer Feuchte von 60 % um den Faktor 1.37 gegenüber dem trockenen Kristall. Man beachte, daß vom atmosphärischen Aerosol dieser Wachstumsfaktor erst bei relativen Feuchten oberhalb 80 % erreicht wird.

Beim Durchströmen des Impaktors kann die relative Feuchte der Luft zunehmen. Wenn die Luft durch die Impaktordüsen strömt, wird sie expandiert und adiabatisch abgekühlt, wodurch der Dampfdruck steigt und die Wasserhülle auf den Partikeln wächst. Diese Effekte sind besonders auf den hinteren Impaktorstufen signifikant, weil dort der größte Druckabfall in den Düsen auftritt. Berner geht davon aus, daß ein durch diesen Effekt bedingtes Partikelwachstum für Partikeln  $> 0.5 \mu\text{m}$  und Düsengeschwindigkeiten  $< 60 \text{ m/s}$  unbedeutend ist (BERNER, 1988). Eine neuere Arbeit (YANG U.A., 2000) zeigt, daß das Partikelwachstum durch Expansion erst für Partikeln kleiner  $2 \mu\text{m}$  Durchmesser wichtig wird. Bei 70 % relativer Feuchte beträgt der Wachstumsfaktor für  $2 \mu\text{m}$  Partikeln 1.01, für  $0,2 \mu\text{m}$  Partikeln 1.11 und für  $0,1 \mu\text{m}$  Partikeln 1.23. Kleine Partikeln wachsen also schneller als größere. Die Wärmeleitung im Impaktor wirkt der adiabatischen Abkühlung entgegen.

Ein weiterer Gesichtspunkt kann auch die Höhe des Meßortes sein, an dem mit dem Impaktor Aerosolpartikeln gesammelt werden, da mit abnehmendem Luftdruck der „Cut-Off“ des Gerätes verschoben wird. Signifikante Einflüsse werden aber erst in Höhen oberhalb von 1 km ü.N.N. sichtbar (HILLAMO UND KAUPPINEN, 1991). Die Tests wurden aber im Münchener Raum in 550 m Seehöhe durchgeführt.

#### c) *Koagulation von Partikeln $< 1 \mu\text{m}$*

Die Koagulation von Aerosolpartikeln ist ein Prozeß, bei dem Partikeln infolge ihrer Relativbewegung miteinander kollidieren, aneinander haften und somit größere Partikeln bilden. Insgesamt sinkt damit zwar die Partikelanzahl, die Partikelgröße steigt aber an. Entsteht die Relativbewegung durch die Brown'sche Molekularbewegung spricht man von thermischer Koagulation, im Falle von externen Kräften (z.B. Schwerkraft, elektr. Kräfte etc.) von kinematischer Koagulation. Koagulationsverluste treten nur bei hohen Partikelkonzentrationen auf und sind bei den durchgeführten Versuchen ohne Belang.

#### d) *„Bounce-Off“- Effekte*

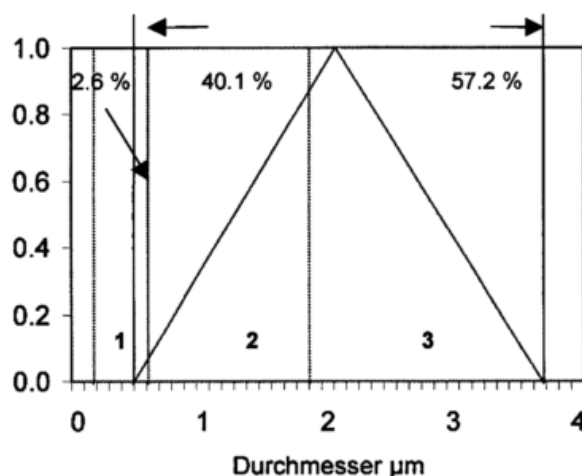
Berührt ein Partikel hinter der Düse die Prallfläche, so sollte es auf Grund der "van der Waal'schen" Kräfte haften. Tragen Partikeln eine Wasserhülle, so wird durch Kapillarkräfte die Haftwirkung erheblich verbessert. Ist ein Partikel wenig hygroskopisch oder ist die Wasserhülle bei geringen Feuchten überhaupt klein, so steigt die Wahrscheinlichkeit, daß dies

Partikel nicht auf der entsprechenden Impaktorstufe abgeschieden wird, sondern abprallt und erst auf einer der nachfolgenden Stufen gesammelt wird. Die größten „Bounce-Off“- Effekte sind also bei niedrigen relativen Feuchten und auf den hinteren Impaktorstufen zu erwarten, weil hier die höchsten Geschwindigkeiten auftreten (siehe auch die Delta Werte in der Tabelle 3).

*Korrekturrechnungen (60 % relative Feuchte):*

Will man kontrollieren, ob ein gewisses Testaerosol bestimmter Größe auch auf der richtigen Impaktorstufe (Sollstufe) abgeschieden wird, so besteht beim polydispers verteilten Aerosol ein einfacher Weg darin, die Streubreite des erzeugten Testaerosols (Partikelgröße des Testaerosols  $\pm$  Standardabweichung SD) und die damit verbundene theoretische prozentuale Verteilung mit der tatsächlichen Verteilung auf die verschiedenen Impaktorstufen zu vergleichen. Hierzu wurde für den vorgegebenen Partikeldurchmesser zuerst die Streubreite berechnet und dann mit einem Faktor für das Feuchtwachstum korrigiert (s. Tabelle 3). Für die Testaerosole wurde nach der Wachstumskurve (Abb. 20) der Faktor mit 1.4 (für 60 - 65 % relative Feuchte) angesetzt. Für das 1.5  $\mu\text{m}$  Testaerosol beträgt der Streubereich z.B. 0.38 - 2.62  $\mu\text{m}$  und nach der Korrektur für das Feuchtwachstum 0.53 - 3.67  $\mu\text{m}$ . Der prozentuale Sollanteil auf der jeweiligen Impaktorstufe wurde durch Abbildung der polydispersen Aerosolverteilung auf die Impaktorstufen berechnet. Die Verteilung des 1.5  $\mu\text{m}$  Testaerosols (0.53 - 3.67  $\mu\text{m}$ ) müßte dann nach folgender Skizze bei den angegebenen "Cut-Offs" (gestrichelte Linien) zu 2.6 % auf der Stufe 1, zu 40.1 % auf der Stufe 2 und zu

Streubreite des Testaerosols 1.5  $\mu\text{m}$  mit Wachstumskorrektur

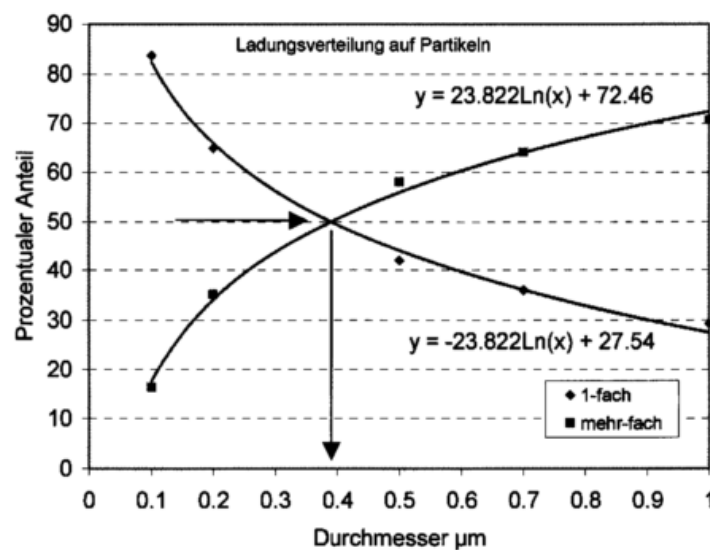


57.2 % auf der Stufe 3 des Impaktors wiederzufinden sein. Die Berechnung erfolgte zuerst ohne „Bounce“-Simulation. Der für die "Bounce"-Simulation bestimmte Delta-Wert wird als die Differenz zwischen theoretischer und im Versuch festgestellter Deposition definiert. Ein

im Versuch ermittelter Wert eines Testaerosol bestimmter Größe, der geringer war als der theoretische Betrag wurde als "Bounce-Off" gewertet, d.h. der fehlende Anteil ist auf der dahinter liegenden Impaktorstufe wiederzufinden. So berechnet sich für das 1.5 µm Testaerosol für die Stufe 3 ein Anteil von 57.2 %. Im Versuch werden aber nur 13.4 % gefunden, dafür aber entsprechend mehr auf der folgenden Stufe, und zwar 86.5 % statt der berechneten 40.1 %. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind im mittleren Teil der Tabelle 3 dargestellt. Das Delta zeigt die Abweichung zwischen der erwarteten und der im Test gefundenen Abscheidung auf den Stufen 3 (1.5-2.3 µm Partikeln) und 4 (5 und 7 µm Partikeln). Obwohl die 7 µm Partikeln nicht auf einer regulären Stufe, sondern auf einem Vorabscheider abgeschieden werden, der bei den Routinemessungen nicht ausgewertet wird, sieht man, daß dieses Delta mit sinkender Partikelgröße bis auf 43.8 % ansteigt.

Dies bedeutet, das auf der vorderen Stufe zu wenig und auf der nachfolgenden Stufe zu viel abgeschieden wird. Dieses Ergebnis scheint ein Indiz dafür zu sein, daß die Partikeln mit steigender Geschwindigkeit und immer komplizierter werdenden Strömungsverhältnissen hinter nebeneinander liegenden Runddüsen auf den Abscheideflächen schlechter haften bleiben, abrallen und auf der nachfolgenden Stufe abgeschieden werden, da dort ihre Trägheit größer ist. Berechnet man die Abscheidung mit einer „Bounce“-Simulation in Höhe der Delta-Werte und mit den Wandverlusten, so decken sich die gerechneten Werte mit den im Test erzielten Ergebnissen sehr gut (unterer Teil der Tabelle 3).

Für die Testaerosole von 0.25 bis 0.7 µm Durchmesser wurde eine ähnliche Vorgehensweise gewählt (s. Tabelle 4): Als erstes wurde aus der Kurve in Abbildung 21 der prozentuale Anteil



**Abbildung 21:** Prozentuale Ladungsverteilung auf Testaerosolen als Funktion des Partikeldurchmessers.

von 1-fach und mehrfach geladenen Partikeln bestimmt, da in der Literatur nur Werte für diskrete Partikelgrößen zu finden sind. Auf Grund der mehrfachen Ladungen haben im DMA Partikeln mit einer Größe bis 0.36 µm die gleiche elektrische Mobilität wie 0.25 µm Partikeln. Als nächstes wurden diese Partikelgrößen wieder mit dem Wachstumsfaktor 1.4 korrigiert, wodurch Partikeln von 0.35 und 0.5 µm Durchmesser entstehen. Trotzdem müßte das gesamte erzeugte Partikelspektrum zu 100 % auf der Impaktorstufe 1 (0.2 – 0.62 µm) abgeschieden werden. Im Test werden aber nur 59.2 % wiedergefunden (s. unterer Teil von Tabelle 4). Weitere 32.8 % werden auf der davor liegenden Stufe abgeschieden, d.h. daß "Bounce-Off"

**Tabelle: 3**

Vergleich zwischen tatsächlicher und berechneter Abscheidung auf den Impaktorstufen:  
(Versuche wurden bei rel. Feuchten von 60 - 65 % ausgeführt)

0.2 - 0.62 µm Stufe 1  
0.62 - 1.93 µm Stufe 2  
1.93 - 6.0 µm Stufe 3  
> 6.0 µm Stufe 4

**Erläuterung:**

SD = Standardabweichung  
RF- Faktor = Wachstumsfaktor  
Delta = berechneter Anteil Sollstufe minus Meßergebnis auf der Sollstufe des Impaktors

Partikel Größe µm	SD	RF-Faktor	Partikelgröße		Partikelgröße * RF-Faktor	
			minus SD	plus SD	minus SD	plus SD
1.5	1.12	1.4	0.38	2.62	0.53	3.67
1.6	1.12	1.4	0.48	2.72	0.67	3.81
2.3	1.06	1.4	1.24	3.36	1.74	4.70
5	1.08	1.4	3.92	6.08	5.49	8.51
7	1.06	1.4	5.94	8.06	8.32	11.30

Partikel Größe µm	berechneter Anteil :			Delta	Meßergebnis:			Summe
	Anteil Stufe 1	Anteil Stufe 2	Anteil Stufe 3		Anteil Stufe 2	Anteil Stufe 3	Anteil Stufe 4	
1.5	2.6	40.1	57.2	43.8	86.5	13.4	99.9	
1.6		38.5	61.4	38.4	76.8	23.0	99.8	
2.3		7.2	92.8					
2.3		6.7	86.0	22.4	23.8	63.6	7.3	
		Anteil Stufe 3	Anteil Stufe 4		Anteil < 3	Anteil Stufe 3	Anteil Stufe 4	
5		17.9	82.1	1.5	0.3	10.6	80.6	
7			100.0					
7			77.5	5.7	0.5	0.9	71.8	

Bei der Berechnung der Anteile für die 2.3 µm Partikeln wurden die Werte mit 92.7 % gewichtet, da bereits 7.3 % auf der Stufe 4 abgeschieden wurden !

Bei der Berechnung der Anteile für die 7.0 µm Partikeln wurden die Werte mit 77.5 % gewichtet, da bereits 22.5 % vorne im Impaktor abgeschieden werden !

Partikel Größe µm	berechneter Anteil mit Bounce Simulation				Wand-Verluste	Summe alle Stufen minus Verluste
	Anteil Stufe 1	Anteil Stufe 2 plus Delta	Anteil Stufe 3 minus Delta	Anteil Stufe 4		
1.5	2.6	83.9	13.4		0.1	99.8
1.6		76.9	23.0		0.2	99.7
2.3		29.1	63.6	7.3	5.3	94.7
			plus Delta	minus Delta		
5			19.4	80.6	8.5	91.5
7		0.5	6.6	71.8	4.3	74.6

**Tabelle 4:**

Partikelgröße $\mu\text{m}$	Proz. Anteil 1-fach geladen	Proz. Anteil mehrfach geladen	Partikelgröße durch mehrfach Ladungen	RF-Faktor	Korrigierter Größenbereich
0.25	65.0	35.0	0.36	1.4	0.35-0.5
0.5	44.1	55.9	0.72	1.4	0.7-1.1
0.7	36.0	64.0	1.0	1.4	0.98-1.4

(Siehe hierzu Abbildungen 9, 10 und 11)

Partikelgröße $\mu\text{m}$	Prozentual abgeschiedener Anteil (Theorie)		Prozentualer abgeschiedener Anteil (Messung)		
	auf Stufe 1	auf Stufe 2	auf Stufe 1	auf Stufe 2	auf Stufe 3
0.35-0.5	100	0	59.2	32.8	0.1
0.7-1.1	0	100	24.9	68.1	3.1
0.98-1.4	0	100	4.5	75.1	12.5

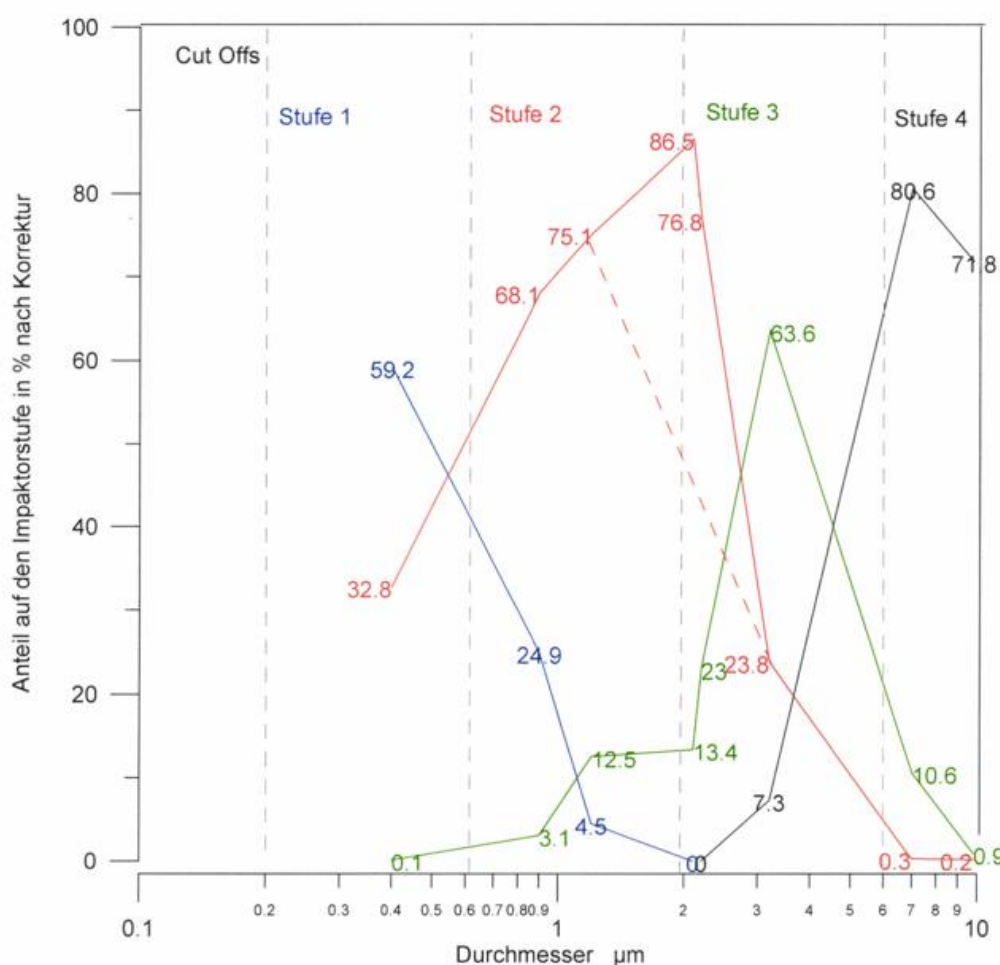
diesen Effekt nicht erklären kann. Die 0.5  $\mu\text{m}$  Partikeln überdecken einen Partikelbereich von 0.7 bis 1.1  $\mu\text{m}$  und müßten daher zu 100 % auf Stufe 2 (0.62 - 1.93  $\mu\text{m}$ ) zu finden sein. Auf der Stufe 2 werden im Test aber wieder nur 68.1 % gefunden. Bei den 0.7  $\mu\text{m}$  Partikeln, mit einem Größenintervall von 0.98 bis 1.4  $\mu\text{m}$ , wird der überwiegende Teil (75.1 %) korrekt auf der 2. Stufe abgeschieden. Auf der Stufe 1 werden 4.5 % gefunden, auf der davor liegenden Stufe 3 (1.93 - 6.0  $\mu\text{m}$ ) aber immerhin noch 12.5 %.

Für diese unscharfe Abscheidung des Testaerosols können zwei Ursachen in Fragen kommen:

1. Eine denkbare Fehlerquelle könnte in der Partikelerzeugung mit Hilfe des DMA's liegen. MCMURRY (2000) weist in einem Review-Artikel über Aerosolmessungen zwar darauf hin, daß Aerosole mit Hilfe eines DMA's unter normalen Bedingungen in einer monodispersen Größe mit ungefähr  $\pm 10\%$  Streuung erzeugt werden können. Dies gilt aber nur für Partikeln kleiner 500 nm mit 1-fach Ladungen. Mehrfache Ladungen komplizieren den Gebrauch des DMA's, besonders bei ansteigender Partikelgröße, weil durch mehrfache Ladungen eine Vielzahl von Aerosolgrößen vom DMA durchgelassen werden. Eine hohe bipolare Ladungsverteilung auf Aerosolen kann zu einem signifikanten Anstieg der Koagulation führen (HINDS, 1982). Geladene Teilchen neigen außerdem eher dazu kettenähnliche Agglomerate zu bilden als ungeladene Partikeln. Bei den durchgeführten Versuchen mit 0.2 bis 0.7  $\mu\text{m}$  Testaerosolen könnte also bei der Aerosolerzeugung mit Hilfe eines DMA's in diesem Größenbereich ein polydisperses Aerosol entstehen. Auf Grund der geringen Zeitkonstante bei den Versuchen ist diese Erklärung aber eher unwahrscheinlich.

2. Ein weiterer und wahrscheinlicher Grund für die unscharfe Aerosolabscheidung kann aber die komplizierte Strömung gerade auf den hinteren Impaktorstufen mit den vielen Runddüsen sein. Wie die digitalen Aufnahmen (Abb. 7) gezeigt haben, treten hier nicht mehr saubere Deponate auf, sondern Nebenlinien, sogenannte Halos und radial nach außen verschobene Deponate. WANG und JOHN (1988) hatten gesehen, daß durch diese Nebenabscheidungen die Abscheidekurve der entsprechenden Impaktorstufe an Steilheit und damit an Trennschärfe verliert. Dieser Effekt wird auch bei den Testaerosolen von 0.25 - 0.7 µm beobachtet: Die Hauptmasse wird zwar auf der richtigen Impaktorstufe abgeschieden, jedoch befinden sich noch beträchtliche Anteile auf den Stufen davor und dahinter.

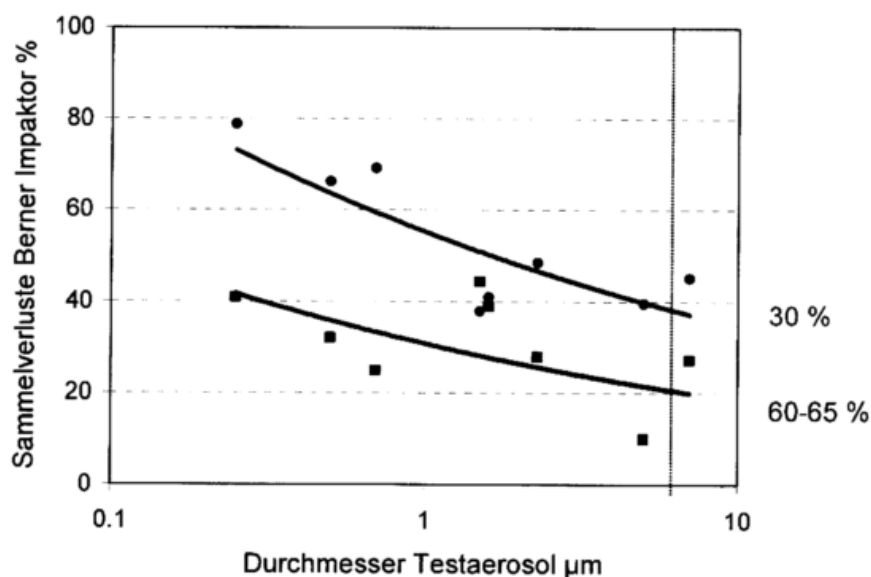
Berichtigt man die Veränderung der Sollgröße infolge Einfluß durch mehrfache Ladungen und Feuchtequellung, so ergeben sich die in Abbildung 22 dargestellten prozentualen Anteile der Testaerosole auf die einzelnen Impaktorstufen.



**Abbildung 22:** Prozentuale Anteile der Testaerosole auf den einzelnen Impaktorstufen nach Feuchtekorrektur (s. Abb. 20) und Korrektur von mehrfachen Ladungen.

Mit nur acht Größen des ausgewählten Testaerosols läßt sich die Abscheidungskurve des Impaktors nur annähernd beschreiben. Die Berücksichtigung von Nicht-Monodispersität und Feuchtequellung ergibt aber eine deutliche Verbesserung, da - abgesehen von den 1.5 und 1.6  $\mu\text{m}$  Testaerosolen - die höchsten Abscheidungen der Testaerosole jetzt auf der richtigen Impaktorstufe liegen. Wie auch Abbildung 23 zeigt, liegen die 1.5 und 1.6  $\mu\text{m}$  Testaerosole immer etwas außerhalb des Kollektives, weshalb der gestrichelte Verlauf der Abscheidungskurve für die Stufe 2 wahrscheinlicher ist. Die Verteilung kann aber durch die zufällige Größenauswahl der Testaerosole in Wirklichkeit noch etwas anders aussehen. Bei der Größenauswahl der Testaerosole stand nicht die Darstellung der Abscheidungskurve des Impaktors im Vordergrund, sondern es sollte eher untersucht werden, wie gut noch Partikeln getrennt werden, die im Grenzbereich des angegebenen „Cut-Offs“ liegen. Man sieht aber ganz deutlich die Unschärfe der Partikeltrennung für kleinere Partikeln.

Insgesamt kann folgendes festgestellt werden: Bei geringen relativen Feuchten ist ein Impaktor ohne Haftmittel kein geeignetes Meßinstrument, weil in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser markante Wandverluste und extremer „Bounce-Off“ auftreten (bis 80 % bei 0.2  $\mu\text{m}$  Partikeln). Wie die Abbildung 23 zeigt, liegen bei Feuchten von etwa 60 % die Impaktorverluste mit dem stark hygroskopischen Testaerosol zwischen etwa 20 und 40 %. Zu den Verlusten zählen Wandverluste bzw. Abscheidungen auf der falschen Impaktorstufe oder dem "Backup"-Filter, die ihre Ursache, wie oben erwähnt, in der komplizierten Luftströmung im Impaktor haben. Erwartungsgemäß fallen die Verluste für kleine Partikeln größer aus. Die 1.5 und 1.6  $\mu\text{m}$  Test-



**Abbildung 23:** Sammelverluste des Berner-Impaktors als Funktion des Partikeldurchmessers bei 30 und 60 – 65 % relativer Feuchte.

aerosole liegen zwar etwas außerhalb der Kurve, ändern aber wenig am Gesamtergebnis. Diese Abweichung zeigt auch die Abscheidekurve in Abbildung 22. Die geringe Größendifferenz ergibt bei 1.5  $\mu\text{m}$  eine Abscheidung von 86.5 % auf der Stufe 2 und bei 1.6  $\mu\text{m}$  eine Abscheidung von 76.8 %, d.h. 10 % weniger. Möglicherweise sind hier Probleme bei der Versuchsdurchführung aufgetreten.

In der Praxis können die Sammelverluste entsprechend höher sein, da atmosphärisches Aerosol selten ausschließlich aus einem rein wasserlöslichen Anteil besteht, sondern auch einen gewissen unlöslichen Anteil besitzt. So zeigt z.B. die Abbildung 20, daß für ein Aerosol aus Mischpartikeln mit 50 % unlöslichem Anteil etwa 80 % relative Feuchte herrschen muß, um die Wasserhülle dieser Teilchen um den gleichen Faktor anwachsen zu lassen wie die des verwendeten Salzgemisches.

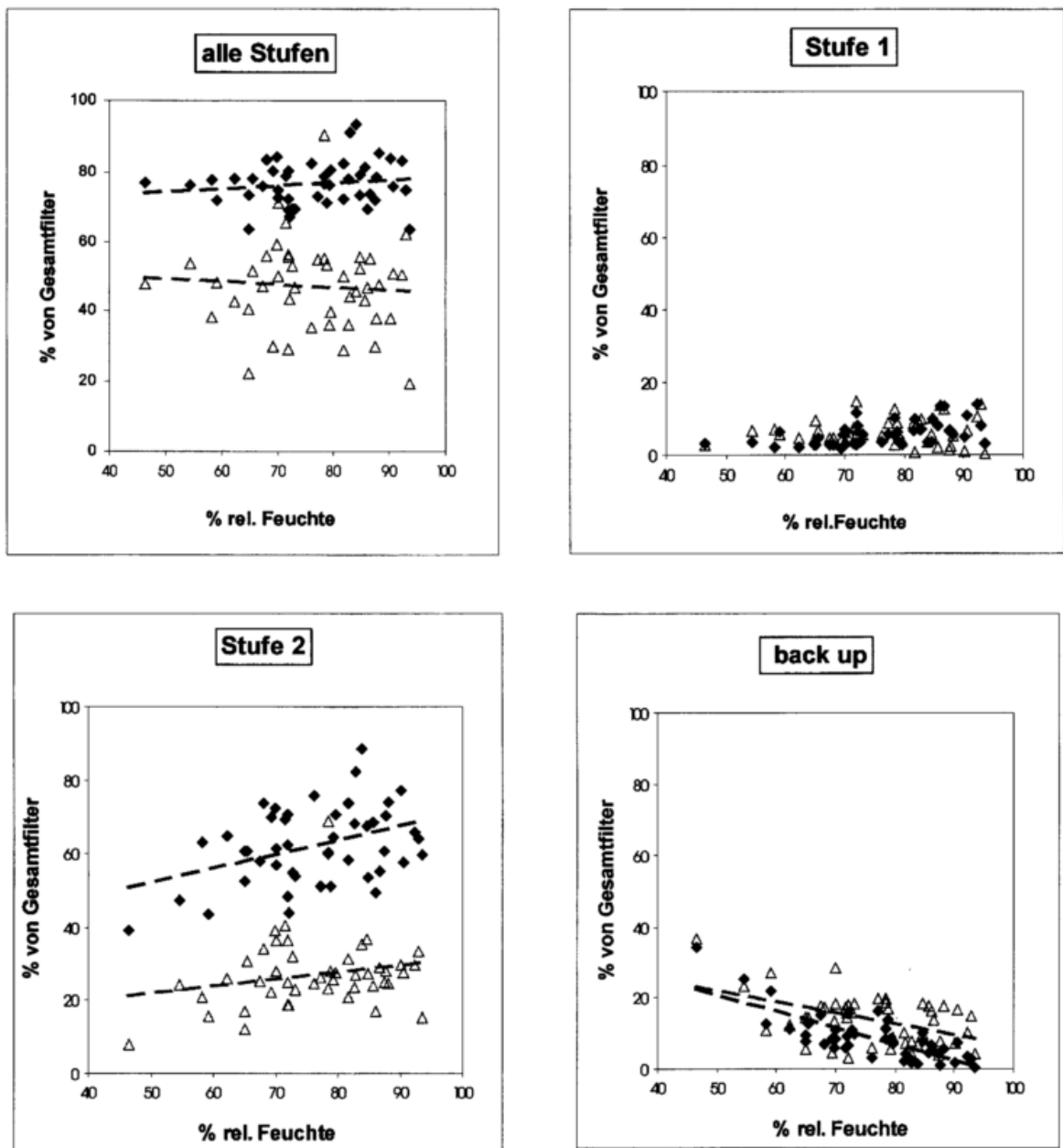
## 7 Parallelbetrieb von Schlitz-Impaktor und Berner-Impaktor

Um zu beurteilen, welcher der beiden Impaktoren für den Routinebetrieb besser geeignet sei, wurden beide Impaktoren für einen Zeitraum von 3 Monaten parallel betrieben. Beide Impaktoren wurden ohne Vorbefeuchter verwendet, die abschließenden Ergebnisse aber wieder als Funktion der mittleren relativen Feuchte dargestellt. An dieser Stelle sei angemerkt, daß, wie oben beschrieben, der Betrieb des Schlitz-Impaktors ohne Vorbefeuchter zu Sammelverlusten führen muß. Um beide Impaktoren zu vergleichen, sollten aber gleiche Versuchsbedingungen vorliegen, da für den Betrieb des Berner-Impaktors kein Vorbefeuchter vorgesehen ist. Zur besseren Vergleichbarkeit der Impaktorstufen wurden beim Berner-Impaktor zwei Stufen addiert:

	Berner Impaktor	Schlitz Impaktor
1. Stufe	$d = 1.93 - 6.0 \mu\text{m}$	$d > 2.0 \mu\text{m}$
2. Stufe	$d = 0.2 - 1.93 \mu\text{m}$	$d = 0.2 - 2.0 \mu\text{m}$
Back-up	$d < 0.2 \mu\text{m}$	$d < 0.2 \mu\text{m}$

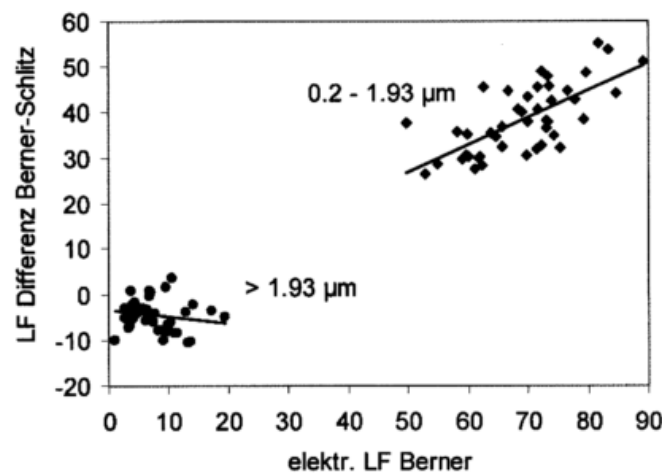
Gesammelt wurde über einen Zeitraum von 24 Stunden. Beim Schlitz-Impaktor wurde aber nicht, wie sonst üblich, die Abscheidefläche weiterschoben. Diese Maßnahme verhindert normalerweise, daß die Flächenbelegung durch Aerosolpartikeln auf der Impaktionsfläche zu dick wird. Durch eine hohe Flächenbelegung auf eine kleinere Gesamtfläche als beim Berner Impaktor kann das Deponat abbröckeln, wodurch Aerosolpartikeln verlorengehen.

In der Abbildung 24 ist dargestellt, wieviel Prozent die beiden Impaktoren, verglichen mit



**Abbildung 24:** Vergleich von Schlitz- und Berner-Impaktor, bezogen auf ein Gesamtfilter, als Funktion der relativen Feuchte (leere Dreiecke: Schlitz-Impaktor, ausgefüllte Rauten: Berner-Impaktor).

einem parallel betriebenen Gesamtfilter, als Funktion der relativen Feuchte sammeln. Die linke obere Grafik zeigt, wieviel Prozent vom Gesamtfilter alle Stufen gemeinsam ergeben, die restlichen Grafiken den Beitrag der einzelnen Impaktorstufen und des Backup Filters. Bei der Betrachtung aller Stufen fällt auf, daß der Berner-Impaktor im Mittel über 80 % des vom Gesamtfilter abgelösten Materials sammelt und der Schlitz-Impaktor im Mittel nur 40 %. Beim Hamburger Datensatz (s. Abb. 4) konnten diese geringen Anteile gegenüber dem Gesamtfilter nicht beobachtet werden. Ein analoges Bild zeigt die 2. Impaktorstufe, weil hier die Hauptmasse impaktiert wird. Die hohen Minderbefunde können ein Indiz dafür sein, daß Aerosolmasse dadurch verlorengegangen ist, daß über einen Sammelzeitraum von 24 Stunden beim Schlitz Impaktor die Flächenbelegung zu hoch geworden ist. Dafür spricht auch das in der Abbildung 25 dargestellte Ergebnis:



**Abb. 25:** Differenz der elektrischen Leitfähigkeit Berner minus Schlitz-Impaktor für die Impaktorstufen  $0.2 - 1.93 \mu\text{m}$  und  $> 1.93 \mu\text{m}$  als Funktion der elektr. Leitfähigkeit des Berner Impaktors

Trägt man für die beiden Impaktorstufen  $0.62 - 1.93 \mu\text{m}$  und  $> 1.93 \mu\text{m}$  die Differenz der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten zwischen Berner und Schlitz-Impaktor als Funktion der elektrischen Leitfähigkeit des Berner Impaktors auf, so zeigt sich, wenn die Leitfähigkeit des Berner Impaktors als Hilfsgröße für die Flächenbelegung der Impaktorstufe angesehen wird, daß die Abweichung zwischen den beiden Impaktoren für die  $0.62 - 1.93 \mu\text{m}$  Stufe mit steigender Flächenbelegung wächst. Die Stufe  $> 1.93 \mu\text{m}$  zeigt diesen Effekt auf Grund der geringeren Belegung nicht.

Bei geringen Feuchten zeigen beide Impaktoren Sammelverluste, die sich auf dem Back-up Filter wiederfinden. Die 1. Stufe zeigt keine markanten Unterschiede bei den Impaktoren, die gemessene Leitfähigkeit liegt beim Schlitz-Impaktor etwa 20 % höher, weil er alle Partikeln

größer 2 µm erfaßt, während der Berner-Impaktor durch die Vorabscheiderstufe die Partikelfraktion bei 6 µm abschneidet. Das „Back-up“-Filter zeigt etwas höhere Werte beim Schlitz-Impaktor. Beide Impaktoren zeigen auf dem "Back-up"-Filter höhere Werte bei geringen relativen Feuchten.

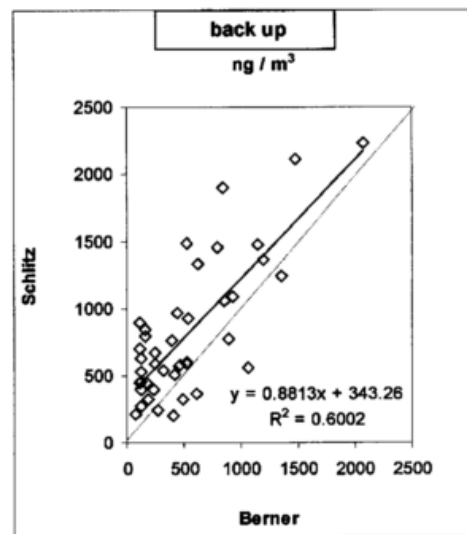
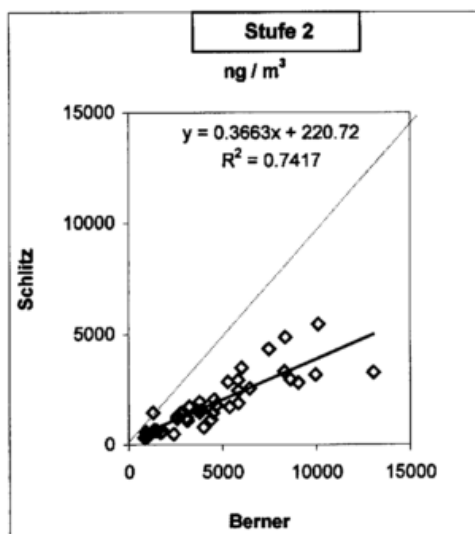
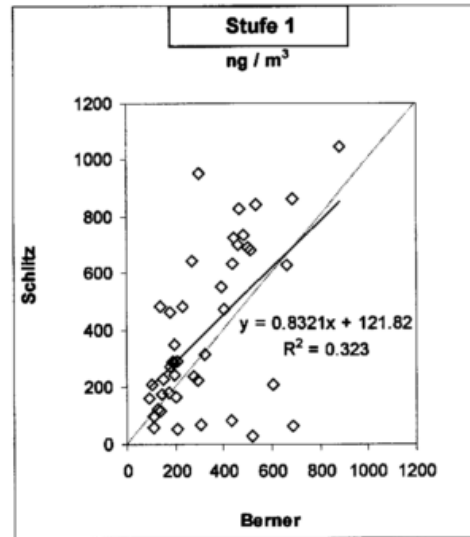
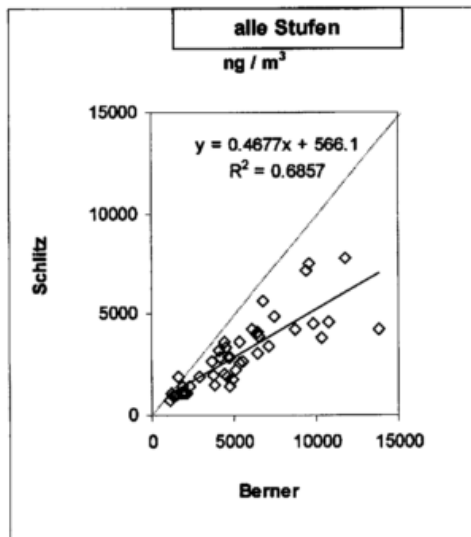
Einen noch besseren Vergleich liefert die Abbildung 26, in der die analysierten Ionenäquivalente gegeneinander aufgetragen sind. Mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von etwa 0.7, sowohl bei allen Stufen als auch auf der 2. Stufe, verlaufen die Ionenäquivalente zwar annähernd parallel, aber der Schlitz-Impaktor zeigt wieder nur eine halb so große Sammeleffizienz wie der Berner-Impaktor. Die 1. Stufe zeigt eine bessere Übereinstimmung, obwohl auf Grund der geringen Konzentrationen eine relativ hohe Streuung der Meßwerte auftritt. Das „Backup“-Filter liefert etwas höhere Konzentrationen beim Schlitz-Impaktor, ansonsten aber vergleichbare Ergebnisse.

Zieht man für den Impaktorvergleich statt der Gesamtionenäquivalente die Einzelionen in Betracht, so ergibt sich ein recht differenziertes Bild: Für die Elemente Natrium und Magnesium werden von beiden Impaktoren auf allen Stufen in etwa gleiche Konzentrationen nachgewiesen. Calcium liegt beim Schlitz-Impaktor auf fast allen Stufen höher als beim Berner-Impaktor. Chlorid stimmt in der Summe aller Impaktorstufen recht gut überein, bei den Riesenpartikeln sammelt der Schlitz-Impaktor deutlich mehr, bei den Großen Partikeln deutlich weniger. Nitrat, Sulfat, Ammonium und Kalium erreichen beim Schlitz-Impaktor nur die Hälfte der Konzentrationen, die vom Berner-Impaktor gesammelt werden. Eine Ausnahme stellt die Nitratkonzentration der Riesenpartikeln dar, die bei beiden Impaktortypen sehr gut übereinstimmt.

Insgesamt hat der Vergleich gezeigt, daß Aerosole die auf der ersten Impaktorstufe abgeschieden werden oder Ionen, die hauptsächlich bei den Riesen Partikeln in höheren Konzentrationen vorkommen recht gut übereinstimmen. Die Ergebnisse der zweiten Stufe sind mit Vorsicht zu interpretieren, weil wie oben erwähnt, der Verdacht naheliegt, daß bei dem Impaktorvergleich beim Schlitz-Impaktor in dieser Fraktion Sammelverluste durch Überladung aufgetreten sind.

Da eine objektive Beurteilung der Sammelqualitäten beider Impaktoren schwierig ist, wurde auf ein unabhängiges Meßverfahren zurückgegriffen, das, wenn auch mit vereinfachten Annahmen, eine relative Bestimmung der Aerosolmasse in verschiedenen Größenklassen gestattet.

Für diese Abschätzung wurden Aerosolgrößenverteilungen, die mit einem Laserspektrometer (PMT, LAS-X) gemessen wurden, über die Intervalle integriert, die den Impaktorstufen



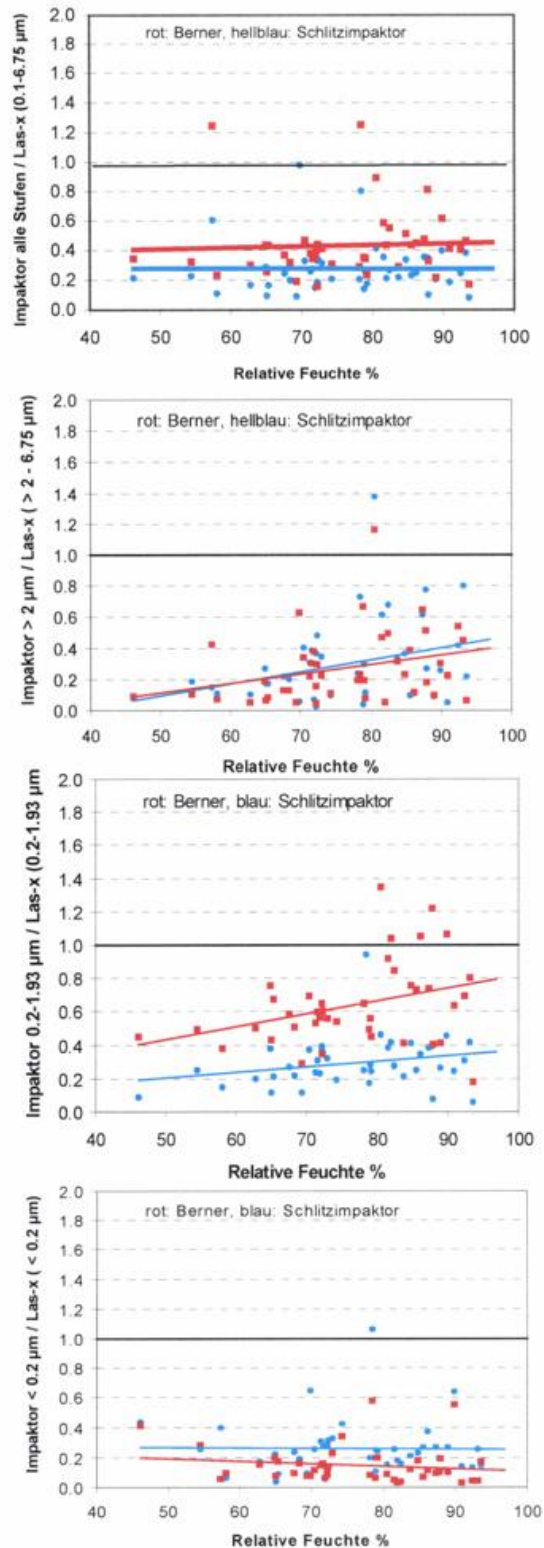
**Abbildung 26:** Vergleich der Ionenäquivalente von Berner- und Schlitz-Impaktor.

entsprechen und in Massen umgerechnet. In der Abbildung 27 ist das prozentuale Verhältnis der verschiedenen Impaktorstufen bzw. des „Backup“-Filters zum Integral der entsprechenden Größenklassen des LAS-X als Funktion der relativen Feuchte dargestellt. Der LAS-X gibt sicher nicht die absoluten Aerosolmassen wieder (Faktor 1,6 höher als das Gesamtfilter), da man bei der Berechnung von kugelförmigen Partikeln mit Einheitsdichte ausgeht und die Messung in etwa 400 m Entfernung von den Impaktormessungen durchgeführt wurde. Trotzdem sind diese Daten als relativer Bezug geeignet.

Der Vergleich der Aerosolmasse aller Stufen zeigt ein ähnliches Bild wie schon die Abbildungen 25 und 26. Die Sammeleffizienz des Berner-Impaktors liegt bezogen auf den LAS-X im Mittel höher als die des Schlitz-Impaktors bei zu hoher Flächenbelegung. Bei den Riesenpartikeln ( $> 2 \mu\text{m}$ ) zeigen beide Impaktoren gleiche Sammeleffizienz, aber eine deutliche Feuchteabhängigkeit. Während sich bei hohen Feuchten die Impaktorwerte recht gut den LAS-X Werten nähern, sammeln die Impaktoren bei geringen Feuchten im Vergleich zum LAS-X nur minimale Mengen. Ein Ergebnis, das auch die Untersuchung des Berner-Impaktors mit Testaerosolen ergeben hatte. Zur Erinnerung: Bei 30 % relativer Feuchte waren noch 25 % der  $5 \mu\text{m}$  Partikeln auf dem Backup-Filter wiederzufinden und 50 % auf der Sollstufe. Bei den Partikeln  $0.2 - 1.93 \mu\text{m}$  Durchmesser tritt wieder die Feuchteabhängigkeit hervor, aber auch eine höhere Sammeleffizienz beim Berner-Impaktor, obwohl die Meßwerte gerade bei hohen Feuchten stark streuen. Wie oben erwähnt, können aber durch eine zu hohe Flächenbelegung in der 2. Stufe des Schlitz-Impaktors Verluste aufgetreten sein.

Das „Backup“-Filter zeigt, verglichen mit dem LAS-X nur geringste Mengen. Die LAS-X Messungen wurden aber während des Vergleichszeitraums häufig durch Autoabgase von Schwerkraftfahrzeugen im Zusammenhang mit einer Neubaumaßnahme gestört. Durch quellnahe Autoabgase werden aber gerade sehr viele kleine Aerosolpartikeln erzeugt, die in 400 m Entfernung nicht mehr zu sehen sind, weshalb der Vergleich unrealistisch ist.

Konsistent ist aber, daß die Minderbefunde beim Schlitz-Impaktor auf der 2. Stufe zu einem Überschuß gegenüber dem Berner Impaktor auf dem „Backup“-Filter beitragen.



**Abbildung 27:**

Prozentuales Verhältnis der verschiedenen Impaktorstufen bzw. des Backup-Filters zum Integral der entsprechenden Größenklassen des LAS-X als Funktion der relativen Feuchte.

## 8 **Schlußfolgerung:**

Kaskadenimpaktoren mit einer Vielzahl von Stufen sind ein weit verbreitetes Meßinstrument zur größenfraktionierten Probenahme von Aerosolpartikeln für die anschließende chemische Analyse. Leider sind diese Instrumente mit dem Mangel behaftet, daß Partikeln auf den Abscheideflächen nicht immer haften bleiben, sondern abprallen und auf der nachfolgenden Stufe gesammelt werden.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, daß Impaktoren, die ohne Haftmittel eingesetzt werden, für eine größenfraktionierte Aerosolprobenahme nur bei Umgebungsfeuchten deutlich größer 60 % ( etwa 75 %) ein geeignetes Meßinstrument darstellen. Bei geringen Feuchten treten enorme „Bounce-Off“-Effekte auf (bei 0.2 µm Partikeln bis zu 80 %). Versuche mit einem Testaerosol, bestehend aus einem Salzgemisch, zeigten bei relativen Feuchten von 60 % noch immer „Bounce-Off“-Verluste von etwa 20 - 40 %.

Außerdem verschlechtern bei geringen Feuchten ungünstige Strömungsverhältnisse, insbesondere bei mehrreihigen Düsenkränzen, die Abscheidequalität, so daß markante Wandverluste (etwa 10 %) auftreten. Weiterhin treten Nebenabscheidungen, sogenannte Halos um die Deponate und radial nach außen verschobene Nebenabscheidungen auf. Die Abscheidecharakteristik der hinteren Impaktorstufen verliert damit für die kleineren Partikeln an Trennschärfe, so daß die Abscheidung der Testaerosole z. T. über mehrere Stufen erfolgt.

Um die Sammeleigenschaften von Impaktoren zu verbessern, können zwei Wege beschritten werden. Entweder kann man die Sammelflächen mit einem Haftmittel beschichten (TURNER und HERING, 1987; PAK u.a., 1992) oder die Feuchte anheben, damit die Partikeln eine genügend dicke Wasserhülle haben, die ein abprallen verhindern (WINKLER, 1974, WINKLER, 1988).

Der Einsatz eines Haftmittels bringt häufig Probleme für die nachfolgende chemische Analyse der Impaktorproben, so daß eigentlich nur der Betrieb des Impaktors unter kontrollierten Feuchtebedingungen in Frage kommt. Für zukünftige Messungen an GAW-Stationen muß daher ein Konzept entwickelt werden, wie die Probenahme feuchtekontrolliert verbessert werden kann.

Auch die früheren Messungen mit dem Schlitz-Impaktor haben gezeigt, daß die Sammeleigenschaften durch den Einsatz eines Vorbefeuchters verbessert werden können. Wie ein drei monatiger Parallelbetrieb mit dem Berner Impaktor gezeigt hat, kann der Einsatz dieses Impaktortyps ohne Vorbefeuchter zu höheren Sammelverlusten als denen des Berner Impaktors führen. Ein zusätzlicher Grund für die höheren Sammelverluste des Schlitz Impaktors kann aber

auch die zu hohe Flächenbelegung sein, die bei 24 Stunden Sammeldauer erreicht wird und die ein Abbröckeln der Deponate bewirkt.

Ein Ansatz zum Aerosolsammeln unter kontrollierten Feuchtebedingungen von 70 - 80 % wird auch für den Betrieb mit einem MOUDI-Impaktor beschrieben (VASILIOU u. a., 1999).

Eine weitere Maßnahme die Sammeleigenschaften des Berner Impaktors zu verbessern, könnte darin bestehen die komplizierte Luftströmung im Impaktor zu optimieren, indem der Lufteintritt in die Düsen, d.h. die Übergänge idealer werden. Ziel muß sein, scharfe Deponate ohne Nebenabscheidungen zu erhalten.

## 9 Literatur

BERNER, A.: Praktische Erfahrungen mit einem 20-Stufen-Impaktor. Staub-Reinhaltung der Luft 32 (1972), 315-320.

BERNER, A.; LÜRZER, Ch.; POHL, F.; PREINING, O.; WAGNER, P.: The size distribution of the urban aerosol in Vienna. Sci. Tot. Environ. 13 (1979), 245-261.

BERNER, A.: The collection of fog droplets by a jet impaction stage. Sci. Total Environ., 73 (1988), 217-228.

BERNER, A.; REISCHL, G.: The observation of the wet atmospheric aerosol by Aeras Cascade Impactors. In: WAGNER, P. E. und VALI, G.: Lecture Notes in Physics. Atmospheric Aerosol and Nucleation. Bd. 309. Berlin: Springer Verlag, 1988, 126-129.

BERNER, A.: Haze and its relation to atmospheric accumulation aerosol. Sci. Tot. Environ. 86 (1989), 251-263.

BERNER, A.: Persönliche Mitteilung. (1999).

COLEMAN, T. L.; GALVIN, P. J.; MOHNEN, V. A.: Report of the 22<sup>nd</sup> Intercomparison of WMO/GAW Precipitation Chemistry Laboratories. WDCPC No. 5. Atmospheric Sciences Reserach Center, University at Albany, New York. (2000).

DAVIES, C.N.: Particle Fluid Interaction. J. Aerosol Sci., 10 (1979), 477-513.

FANG, C. P.; MARPLE, V. A.; RUBOW, K. L.: Influence of cross-flow on particle collection characteristics of multi-nozzle impactors. J. Aerosol Sci. 22 (1991), 403-415.

HILLAMO, R. E.; KAUPPINEN, E. I.: On the performance of the Berner Low Pressure Impactor. Aerosol Sci. Technol. 14 (1991), 33-47.

HINDS, W.C.: Aerosol Technology – Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, New York (1982).

JAENICKE, R.: Der Doppelstufenimpaktor, eine weiterte Anwendung des Impaktorprinzips. Staub-Reinhaltung der Luft 31 (1971), 229-236.

JAENICKE, R.; BLIFFORD, I. H.: The influence of aerosol characteristics on the calibration of impactors. J. Aerosol Sci. 5 (1974), 457-464.

KAMINSKI, U. und WINKLER, P.: Die luftchemischen Meßreihen des Meteorologischen Observatoriums Hamburg. Berichte des DWD Nr. 192. (1994), Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

KAUPPINEN, E.; HILLAMO, R.; RUUSKANEN, J.; HAKKARAINEN, T.; ROUHIAINEN, P.: Theoretical and experimental study of particle collection characteristics of high-velocity multijet cascade impactors. J. Aerosol Sci. 17 (1986), 506-510.

- LIU, B.Y.H und PUI, D.Y.H.: A Submicron Aerosol Standard and the Primary, Absolute Calibration of the Condensation Nuclei Counter. *J. of Colloid and Interface Science* 47 (1974), 155-171.
- MARJAMÄKI, M., Virtanen, A., Keskinen, J.: Fine Particle losses in cascade impactors. *J. Aerosol Sci.* 29 (1998), 441-442.
- MARPLE, V. A.; LIU, B. Y. H.; WHITBY, K. T.: Fluid mechanics of the laminar flow aerosol impactor. *J. Aerosol Sci.* 5 (1974), 1-16.
- MARPLE, V. A.; LIU, B. Y. H.: Characteristics of laminar Jet Impactors. *Environ. Sci. Technol.* 8 (1974), 648-654.
- MCMURRY, P.H.: A Review of atmospheric aerosol measurements. *Atmos. Environ.* 34 (2000), 1959-1999.
- PAK, S.S.; LIU, B.Y.H.; RUBOW, K.L.: Effect of coating thickness on particle bounce in inertial impactors. *Aerosol Science and Technology* 16 (1992), 141-150.
- PUI, D.Y.H. et. al.: *Aerosol Measurement*. Hrg. Lundgren, University of Florida (1979).
- SEO, Y.: The influence of evaporation on the deposition of particles in impactors. *J. Aerosol Sci.* 21 (1990), 911-918.
- STEIN, S. W.; TURPIN, B. J.; CAI, X.; HUANG, P. F.; MCMURRY, P. H.: Measurements of relative humidity-dependent bounce and density for atmospheric particles using the DMA-Impactor technique. *Atmos. Environ.* 28 (1994), 1739-1746.
- TURNER, J.R.; HERING, S.V.: Greased and oiled substrates as bounce-free impaction surfaces. *J. Aerosol Sci.* 18 (1987), 215-224.
- VASILIOU, J. G.: Sampling at controlled relative humidity with a cascade impactor. *Atmos. Environ.* 33 (1999), 1049 – 1056.
- WANG, H.- C.; JOHN, W.: Characteristics of the Berner Impactor for sampling inorganic ions. *Aerosol Sci. Technol.* 8 (1988), 157-172.
- WINKLER, P.: Relative Humidity and the adhesion of atmospheric particles to the plates of impactors. *J. Aerosol Sci.* 5 (1974), 235 – 240.
- WINKLER, P.: The Growth of Atmospheric Aerosol Particles with Relative Humidity, *Physica Scripta.* 37 (1988), 223 – 230.
- YANG, J., JAENICKE, R., DREILING, V., PETER, T.: Rapid Condensational Growth of Particles in the Inlet of Particle Sizing Instruments. *J. Aerosol Sci.*, 31 (2000), 773-778.

## 10 Anhang

Im folgenden Anhang sind die detaillierten Testergebnisse des Berner Impaktors noch einmal tabellarisch zusammengestellt. Die Tabellen 1 und 2 enthalten die Verluste im Impaktor für die Testaerosole 0.25 - 1.6  $\mu\text{m}$  (Tab. 1) und 2.3 - 7.0  $\mu\text{m}$  (Tab. 2). In der nachfolgenden Tabelle sind die gleichen Ergebnisse für verschiedene Feuchten nach der Partikelgröße sortiert, um einen schnelleren Überblick der Ergebnisse zu vermitteln.

Die Tabellen 3 und 4 enthalten den Anteil des Testaerosols 0.25 - 1.6  $\mu\text{m}$  (Tab. 3) und 2.3 - 7.0  $\mu\text{m}$  (Tab. 4), der auf den einzelnen Impaktorstufen und dem "Back-up"-Filter abgeschieden wurde. In der nachfolgenden Tabelle sind die gleichen Ergebnisse wieder für verschiedene Feuchten nach der Partikelgröße sortiert.

Verluste in Impaktor	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte									
	0,25/80	0,5/80	0,7/80	1,0/80	1,5/80	2,0/80	3,0/80	4,0/80	5,0/80	6,3/80
Einheit	%									
80-30/5.2 innen (Verschluß)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80-30/5.2 unten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80-30/5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 3 oben	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 3 unten	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 3 Düsen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 3 Ring	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 2 oben	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 2 unten	0.2	0.0	0.0	1.2	4.9	0.5	0.1	5.6	0.5	5.6
Stufe 2 Düsen	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 1 oben	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	1.5	0.4	0.0	0.0	0.0
Stufe 1 unten	1.1	0.1	0.0	0.0	6.5	0.8	0.1	8.8	0.0	6.8
Stufe 1 Düsen	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Innenwände vor Backupfilter	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Filter nach Impaktor	0.3	0.0	0.2	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
Gesamte Verluste	2.3	0.3	0.5	7.1	12.3	6.3	2.1	15.5	0.5	12.5

Anhang: Tabelle 1

Verluste in Impaktor Einheit	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte											
	0,3/0,5	0,5/0,75	0,75/1,0	1,0/1,5	1,5/2,0	2,0/3,0	3,0/4,0	4,0/5,0	5,0/7,0	7,0/10,0	10,0/20,0	
80-30/5.2 innen (Verschluß)	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	10.0	22.5	23.3
80-30/5.2 unten	0.0	1.2	1.2	0.0	0.0	1.6	4.7	7.7	7.7	5.1	1.4	3.3
80-30/5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	1.6
Stufe 3 oben	0.2	1.1	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	8.5	1.5	0.4
Stufe 3 unten	0.2	0.3	0.3	0.0	0.0	0.4	2.8	0.0	0.0	1.0	0.2	0.0
Stufe 3 Düsen	1.1	1.6	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	0.3
Stufe 3 Ring	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0
Stufe 2 oben	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0
Stufe 2 unten	7.2	0.1	0.0	0.6	0.0	0.0	3.1	0.9	0.9	1.1	0.0	0.0
Stufe 2 Düsen	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
Stufe 1 oben	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0
Stufe 1 unten	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0
Stufe 1 Düsen	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Innenwände vor Backupfilter	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0
Filter nach Impaktor	1.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2
Gesamte Verluste	5.3	1.6	0.0	0.0	0.0	7.5	11.2	8.6	8.6	22.9	2.9	5.9

Anhang: Tabelle 2

Verluste in Impaktor	Partikeldurchmesser / 30 % Relative Feuchte							
	0.25	0.5	0.7	1.5	2.3	3	7	
Einheit	%							
80-30/5.2 oben (Vorabscheider = Stufe 4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	10.0
80-30/5.2 unten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	5.1
80-30/5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
Stufe 3 oben	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	8.5
Stufe 3 unten	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	2.8	1.0
Stufe 3 Düsen	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	1.1	0.0	0.5
Stufe 3 Ring	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.8
Stufe 2 oben	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	1.9
Stufe 2 unten	0.2	2.3	4.9	5.6	5.6	7.2	3.1	1.1
Stufe 2 Düsen	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2
Stufe 1 oben	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	4.4
Stufe 1 unten	1.1	4.4	6.5	8.8	6.8	4.7	3.7	1.4
Stufe 1 Düsen	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3
Innenwände vor Backupfilter	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	1.2
Filter nach Impaktor	0.3	0.3	0.0	0.1	0.1	1.2	0.2	0.1
Gesamte Verluste	2.3	7.1	12.3	14.5	12.5	16.3	14.4	37.4

Verluste in Impaktor	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte							
	0.25	0.5	0.7	1.5	2.3	3	7	
Einheit	%							
80-30/5.2 oben (Vorabscheider = Stufe 4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	22.5
80-30/5.2 unten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	7.7	1.4
80-30/5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Stufe 3 oben	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	1.1	0.0	1.5
Stufe 3 unten	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2
Stufe 3 Düsen	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.6	0.0	0.8
Stufe 3 Ring	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1
Stufe 2 oben	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Stufe 2 unten	0.0	1.2	0.5	0.5	0.5	0.1	0.9	0.0
Stufe 2 Düsen	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Stufe 1 oben	0.2	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 1 unten	0.1	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 1 Düsen	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Innenwände vor Backupfilter	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Filter nach Impaktor	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2
Gesamte Verluste	0.3	1.2	6.3	0.5	0.5	3.3	8.5	26.9

Verluste in Impaktor	Partikeldurchmesser / 80 % Relative Feuchte			
	0.25	0.7	2.3	7
Einheit	%			
80-30/5.2 innen (Verschluß)	0.0	0.3	0.7	23.3
80-30/5.2 unten	0.0	0.0	1.6	3.3
80-30/5.1	0.0	0.0	0.1	1.6
Stufe 3 oben	0.0	0.3	1.7	0.4
Stufe 3 unten	0.0	0.0	0.4	0.0
Stufe 3 Düsen	0.0	1.0	2.3	0.3
Stufe 3 Ring	0.0	0.0	0.2	0.0
Stufe 2 oben	0.0	0.0	0.2	0.0
Stufe 2 unten	0.0	0.1	0.0	0.0
Stufe 2 Düsen	0.1	0.0	0.0	0.0
Stufe 1 oben	0.0	0.4	0.1	0.0
Stufe 1 unten	0.0	0.1	0.0	0.0
Stufe 1 Düsen	0.2	0.1	0.0	0.0
Innenwände vor Backupfilter	0.0	0.0	0.2	0.0
Filter nach Impaktor	0.2	0.0	0.1	0.2
Gesamte Verluste	0.5	2.4	7.5	23.1

Anteil auf den Stufen Einheit	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte									
	0.25/30	0.25/80	0.5/30	0.7/80	1.5/30	1.5/80	3.0/30	3.0/80	6.0/30	6.0/80
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Stufe 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	2.0	0.0	0.0	0.0
Stufe 3	0.1	0.1	0.2	3.1	1.7	12.5	17.2	2.7	13.4	7.4
Stufe 2	8.0	32.8	36.9	68.1	19.2	75.1	75.1	53.2	86.5	46.9
Stufe 1	13.0	59.2	61.0	9.4	9.5	4.5	2.9	6.2	0.0	4.7
Backup Filter	76.6	7.7	1.4	59.2	56.9	0.2	0.4	23.4	0.0	28.5
Summe	99.7	99.9	98.3	98.3	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7
Verlust	2.3	0.3	0.5	7.1	12.3	6.3	2.4	14.5	0.1	12.5
										0.5

Anhang: Tabelle 3

Anteil auf den Stufen Einheit	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte									
	2,3/30	2,3/70	2,3/80	5,0/30	7,0/30	7,0/50	7,0/80			
	%									
Stufe 4	3.4	7.3	8.1	9.6	10.1	42.7	80.6	50.6	71.8	70.2
Stufe 3	26.9	63.6	66.8	70.1	65.4	14.3	10.6	3.4	0.9	0.5
Stufe 2	17.5	23.8	23.5	19.7	17.0	2.4	0.2	0.5	0.2	0.1
Stufe 1	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.3	0.2	0.0
Backup Filter	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	25.2	0.1	7.7	0.1	0.1
Summe	83.6	94.7	98.4	99.4	92.5	85.6	91.5	62.6	73.4	70.9
Verlust	16.4	5.3	1.6	0.6	7.5	14.4	8.5	37.4	26.9	29.1

Anhang: Tabelle 4

Anteil auf den Stufen Einheit	Partikeldurchmesser / 30 % Relative Feuchte							
	0.25	0.5	0.7	2.3	5	7		
	%							
Stufe 4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	3.4	42.7	50.6
Stufe 3	0.1	0.7	1.7	2.7	7.4	26.9	14.3	3.4
Stufe 2	8.0	23.6	19.2	53.2	46.9	17.5	2.4	0.5
Stufe 1	13.0	9.4	9.5	6.2	4.7	3.7	1.0	0.3
Backup Filter	76.6	59.2	56.9	23.4	28.5	32.1	25.2	7.7
Summe	97.7	82.9	87.1	89.8	87.6	83.6	86.6	82.4
Verlust	2.3	7.1	12.3	14.5	12.5	16.4	14.4	37.4

Anteil auf den Stufen Einheit	Partikeldurchmesser / Relative Feuchte							
	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	7.3	80.6	71.8
	%							
Stufe 4	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	7.3	80.6	71.8
Stufe 3	0.1	3.1	12.5	13.4	23.0	63.6	10.6	0.9
Stufe 2	32.8	68.1	75.1	86.5	76.8	23.8	0.2	0.2
Stufe 1	59.2	24.9	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Backup Filter	7.7	2.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Summe	97.7	98.3	83.7	89.9	96.8	74.7	91.5	73.5
Verlust	0.3	1.2	6.3	0.1	0.2	5.3	8.5	26.9

Anteil auf den Stufen Einheit	Partikeldurchmesser / 80 % Relative Feuchte			
	0.25	0.7	2.3	7
	%			
Stufe 4	0.0	2.0	10.1	70.2
Stufe 3	0.2	17.2	65.4	0.5
Stufe 2	36.9	75.1	17.0	0.1
Stufe 1	61.0	2.9	0.0	0.0
Backup Filter	1.4	0.4	0.0	0.1
Summe	99.6	97.6	92.5	70.9
Verlust	0.5	2.4	7.5	29.1