

# Sammelverhalten von Impingern als Bioaerosolsammler

H. Lödding, W. Koch, C. Möhlmann, A. Kolk

**Zusammenfassung** Die Sammlung von Aerosolen über die Trägheitsabscheidung in Flüssigkeiten, das sogenannte Impingement-Verfahren, wird seit Jahrzehnten eingesetzt. Die Methode scheint für wenige Mikrometer große Aerosole gut geeignet zu sein, während die Sammeleffizienz für größere Partikeln im Bereich der einatembaren Fraktion unbekannt war. In der vorliegenden Arbeit wurde die Sammeleffizienz an einem neu entwickelten Impinger für einen Volumenstrom von 12,5 l/min bestimmt. Die Effizienz der Ansaugöffnung war zwar ausreichend für die einatembare Aerosolfraction, allerdings sind die weiteren Abscheideverluste im Tauchrohr so gravierend, dass oberhalb von ca. 3 µm Partikeldurchmesser nicht mehr genügend Partikeln in die Sammelflüssigkeit gelangen. Die Abscheideeffizienz in der Flüssigkeit wurde nicht untersucht.

## The collection efficiency of impingers as bio-aerosol separators

**Abstract** Using inertia separation in fluids to collect aerosols – the so-called impingement procedure – has been done widely for decades. The procedure appears well-suited for aerosols of just a few micrometres, whereas the collection efficiency for larger particles in the range of the inhalable fraction was largely unknown. The present paper describes the collection efficiency of a newly developed impinger with an air flow of 12.5 l/min. The aspiration efficiency was sufficient for the inhalable aerosol fraction, but the other deposition losses in the sampling tube were so severe that an insufficient number of particles larger than around 3 µm reached the collection fluid. The separation efficiency in the fluid was not studied.

## 1 Einleitung

Das Sammelprinzip des Impingers wird seit mehr als 60 Jahren verwendet, um Aerosole und insbesondere Bioaerosole wie Bakterien und Schimmelpilzsporen in Flüssigkeiten zu sammeln. Weite Verbreitung fanden der All-Glass-Impinger (AGI, Hersteller: Ace Glass Inc., USA) [1] und der Midget-Impinger [2]. Der Impingementprozess beruht auf einer Beschleunigung der Aerosole durch eine Düse und nachfolgender Abscheidung in einer Flüssigkeit. Beim Auftreffen der Partikeln auf eine Flüssigkeit werden sie teilweise durch Impaktion auf der Flüssigkeitsoberfläche abgeschieden, aufgrund der hohen Luftgeschwindigkeit bilden sich aber gleichzeitig Luftblasen in der Flüssigkeit. In diesen Blasen findet eine weitere Abscheidung durch Diffusion, Sedimentation und Interzeption statt. Durch die Abscheidung in Flüssigkeiten erwartet man eine hohe Überlebensrate für empfindliche Bioaerosole, wie z. B. gramnegative Bakterien, die anschließend im Labor durch Kultivierung nachgewiesen

werden sollen. Vergleiche mit anderen Sammelverfahren wie Aerosolprobenahmeköpfe mit Planfiltern, die problematischer in der Anwendung bei Bioaerosolen sind, werden in diesem Beitrag nicht beschrieben. Die Sammeleffizienz solcher Probenahmeköpfe ist im Allgemeinen gut bekannt, während dies für Impinger nur sehr begrenzt bei wenigen Mikrometern Partikeldurchmesser der Fall ist. Daraus resultierte die Motivation, die größenabhängige Sammeleffizienz der Impinger für die gesamte einatembare Aerosolfraction genauer zu bestimmen und eventuell zu verbessern.

Bioaerosole liegen frei in der Luft vor oder agglomerieren mit anderen Aerosolen, organischer wie anorganischer Zusammensetzung. Prinzipiell muss bei der Erfassung von Aerosolen an Arbeitsplätzen darauf geachtet werden, dass die relevanten Fraktionen entsprechend ihrer Definition gesammelt werden. Es handelt sich um die einatembare und die alveolengängige Fraktion: Diese sind in der Norm DIN EN 481 [3] definiert und umfassen die Bereiche von 0 bis 100 µm (einatembar) bzw. von 0 bis 15 µm (alveolengängig, mit 50-%-Wert bei 4 µm).

Die bisherigen Erkenntnisse zur Sammeleffizienz der gegenwärtig genutzten Impinger umfassten nur teilweise Informationen für Partikelgrößen bis 10 µm. Sie scheinen ihr Maximum etwa bei 1 bis 2 µm zu erreichen, verschlechtern sich aber sowohl zu kleineren als auch zu größeren Partikeldurchmessern [4; 5].

Aus diesem Grunde schien es sinnvoll, einen Impinger so weiter zu entwickeln, dass die einatembare Staubfraktion damit erfasst und gesammelt werden kann. Hierzu wurden die Prototypen BS-10 und BS-12,5 aus Glas hergestellt, die aus einer mit 90° gekrümmten Ansaugdüse mit Innendurchmessern von 13 bzw. 14,3 mm und anschließendem Tauchrohr mit abschließender Kapillare bestehen (**Bild 1**). Die Kapillare hat einen Durchmesser von ca. 1 bis 1,2 mm und ihre Länge ist so gewählt, dass sie den Volumenstrom auf 10 bzw. 12,5 l/min konstant hält, wenn der Druck am Ausgang des Impingers einen bestimmten Wert unterschreitet. Sie funktioniert im Prinzip wie eine kritische Düse. Die Variante BS-10 für einen Volumenstrom von 10 l/min wurde anfangs entworfen, um auch eine personengetragene Variante mit einer tragbaren Pumpe zu betreiben. Im Laufe der Versuche stellte sich allerdings heraus, dass die Leistungsfähigkeit der verfügbaren tragbaren Pumpen nicht ausreichte, sodass nur die Variante mit 12,5 l/min weiter verfolgt wurde. Im Folgenden werden Ergebnisse zur Ansaug- und Transfer-effizienz von Impingern vorgestellt. Die Aufnahmeeffizienz der Sammelflüssigkeit wird nicht betrachtet.

## 2 Ansaugcharakteristik

Die Untersuchungen zur Ansaugcharakteristik basieren auf der Arbeit von Tsai et al. [6], in der semiempirische Formeln zur Einsaugeffizienz unterschiedlicher (Blunt Body)-Partikelsammler mit gerichteter Ansaugung vorgestellt werden. Als Parameter werden u. a. Partikelgröße  $d_p$ , Windgeschwindigkeit  $u_w$ , Anströmwinkel  $\theta$  sowie der innere und äußere Durchmesser der zylindrischen Einsaugöffnung benutzt. In

Hubert Lödding, Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Koch,

Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin, Hannover.

Dipl.-Phys. Carsten Möhlmann,

Dr. rer. nat. Annette Kolk,

BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin.

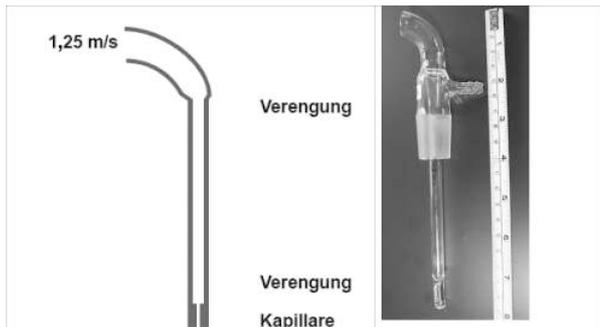


Bild 1. Ansaugstutzen des Impingers BS-10.

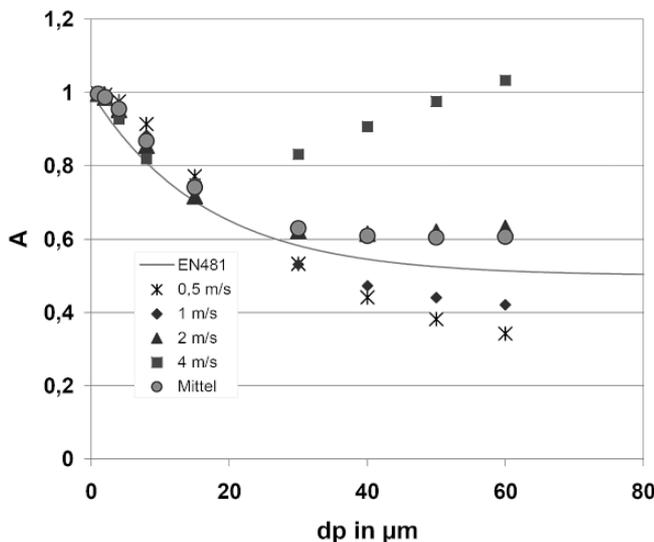


Bild 2. Berechnete windrichtungsgemittelte Einsaugeffizienzen des BS-10-Bioaerosolsammlers.

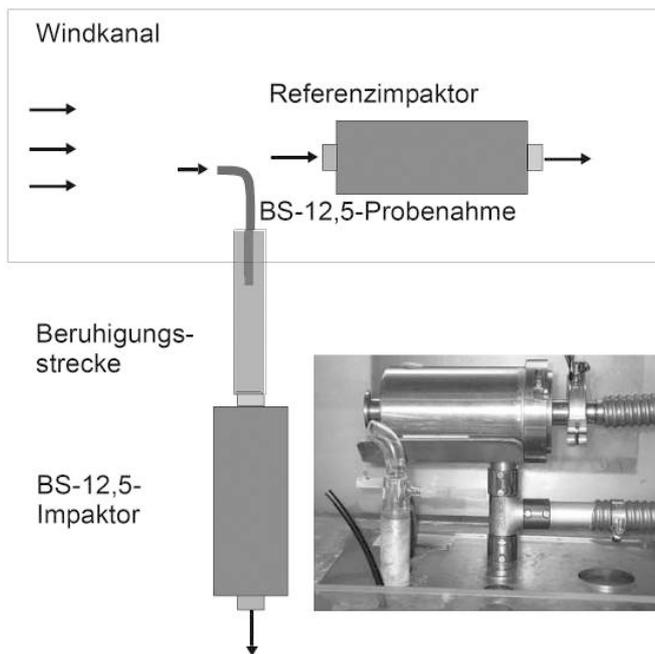


Bild 3. Aufbau der Messapparatur zur Bestimmung der Transferfunktion. Die BS-12,5-Probenahmesonde und der Referenzimpaktor befinden sich im Windkanal.

der Arbeit werden semiempirische Gleichungen zur Berechnung der Aspirationseffizienz  $A$  für  $\theta = 0$ ,  $\theta = \pi/2$  und  $\theta = \pi$  angegeben. Weiterhin wird eine Formel zur Mittelung über den Anströmwinkel  $\theta$  vorgeschlagen (Gl. 14 in [6]). Die Fitparameter in den Formeln basieren auf experimentellen Daten für vier verschiedene Sammler, die im Partikelgrößenbereich bis  $90 \mu\text{m}$  für Anströmgeschwindigkeiten bis  $9 \text{ m/s}$  untersucht wurden. **Bild 2** gibt die Ergebnisse für das System BS-10 wieder. Für Windgeschwindigkeiten bis ca.  $2 \text{ m/s}$  stimmen die so ermittelten Einsaugdaten gut mit der Konvention nach DIN EN 481 für den einatembaren Staub überein.

Insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten ist der Einfluss der Orientierung auf die Erfassung von Partikeln  $> 10 \mu\text{m}$  sehr ausgeprägt und durch eine Überbewertung bei direkter Anströmung und sehr geringer Sammeleffizienz bei seitlicher oder rückwärtiger Anströmung gekennzeichnet. Dies ist insbesondere für Außenluftmessungen von Bedeutung.

### 3 Transfereffizienz

Die Transferfunktion der Probenahmeleitung des Systems BS-12,5 wurde mithilfe zweier achtsufiger Kaskadenimpaktoren (Typ Berner, LPI 30,0.06) gemessen. Dazu wurde der Aufbau in **Bild 3** verwendet. Ein Referenzimpaktor befand sich direkt in einem Strömungskanal. Der zweite Impaktor war über ein  $30 \text{ cm}$  langes Rohr hinter die BS-12,5-Probenahmeleitung geschaltet. Die Transferfunktion wurde durch Vergleich der Größenverteilungen der beiden Impaktoren nach Beaufschlagung mit polydispersen Testaerosolen ermittelt.

Die Kapillare der BS-Probenahmeleitung wirkt als kritische Düse und legt daher den Einsaugvolumenstrom  $Q_{PE} = 12,7 \text{ l/min}$  fest. Der Druck  $P_1$  hinter der Kapillare beträgt  $500 \text{ mbar}$ . Der nachgeschaltete Impaktor arbeitet demnach auf einem niedrigeren Druckniveau als der Referenzimpaktor. Der Einlaufvolumenstrom beträgt  $25,7 \text{ l/min}$ . Dies entspricht  $92 \%$  des Nominalvolumenstroms von  $28 \text{ l/min}$ . Die Abscheidedurchmesser  $d_c$  der Impaktorstufen hängen mit dem Volumenstrom über eine Wurzelfunktion zusammen:

$$d_c \propto \frac{1}{\sqrt{Q}} \quad (1)$$

Für alle Stufen mit Abscheidedurchmessern  $> 0,5 \mu\text{m}$  spielt der Absolutdruck keine Rolle. Volumenstrombedingt ändern sich die Abscheidedurchmesser des Impaktors hinter der BS-12,5-Probenahmeleitung gegenüber denjenigen des Referenzimpaktors um weniger als  $5 \%$ . Sie können daher in guter Näherung gleichgesetzt werden. Zur Bestimmung der Transferfunktion wurden die obersten fünf Impaktorstufen ausgewertet. Die mittleren Durchmesser dieser Stufen sind  $11,3; 5,7; 2,8; 1,4$  und  $0,7 \mu\text{m}$ .

Die Partikelpenetration durch das Ansaugsystem für die Trenndurchmesser der Stufen  $i = 1, \dots, 5$  ergibt sich aus den Massenbelegungen der entsprechenden Impaktorstufen des BS-12,5-Impaktors und des Referenzimpaktors nach Gl. (2):

$$T_i = \frac{28 m_i^{BS12,5}}{12,7 m_i^R} \quad (2)$$

Werte der Partikelpenetration durch das Ansaugsystem des BS-12,5 einschließlich der Kapillare.

Dp in µm	Feststoffpartikel				
	Muster 2	Muster 2	Muster 3	Muster 2	Muster 4
0,707	1,51	---	---	0,71	0,93
1,414	0,66	0,57	0,43	0,74	0,73
2,828	0,41	0,33	0,30	0,13	0,29
5,657	0,17	0,13	0,12	---	---
11,314	0,28	0,10	0,07	---	---

Dp in µm	Öltröpfchen		
	Muster 2	Muster 3	Muster 4
0,707	1,23	1,29	1,07
1,414	0,96	0,98	0,78
2,828	0,49	0,52	0,39
5,657	0,12	0,08	0,08
11,314	0,11	0,15	0,21

--- = aufgrund der Partikelgrößenverteilung waren keine ausreichenden Massenbelegungen vorhanden

Die Beaufschlagung erfolgte mit polydispersen Testaerosolen. Zum einen wurden Lösungen aus Paraffinöl und Toluol, zum anderen aus Natriumchlorid und Wasser mittels Düsenvernebler und Ultraschallvernebler versprüht. Der Sprühnebel wurde eingetrocknet und es resultierte ein polydisperses Testaerosol aus schwer flüchtigen Paraffinöltröpfchen bzw. festen Salzkristallen. Die Probenahmen für das System BS-12,5 und den Referenzimpaktor erfolgten zeitgleich.

#### 4 Ergebnisse

Die Einzelergebnisse für die Partikelpenetration in Abhängigkeit von der Partikelgröße/Größenklasse sind für verschiedene Baumuster in der **Tabelle** zusammengefasst. Werte > 1 für die Partikelpenetration bei 0,7 µm sind vermutlich auf ungleichmäßige Aerosolverteilung im Kanal zurückzuführen. Fotometrische Aerosolmessungen über den Kanalquerschnitt haben Schwankungen im Bereich von 10 % ergeben. Normiert man die Penetrationskurven auf ihren gemittelten Wert bei 0,7 µm, so erhält man die in **Bild 4** dargestellten Verläufe mit den entsprechenden Standardabweichungen. Die Transfereffizienz nimmt zwischen 1 und 10 µm stark ab. Der 50-%-Wert liegt bei etwa 2 µm. Im Penetra-

tionsverhalten durch das Ansaug- und Transfersystem des BS-12,5 besteht zwischen Öltröpfchen und Salzkristallen kein Unterschied.

Es ergibt sich also die unbefriedigende Situation, dass Partikeln > 5 µm quantitativ in der Zuführung zur Waschflaschenflüssigkeit abgeschieden werden. Um die kritischen abscheideträchtigen Stellen des Probenahmesystems zu identifizieren, wurden theoretische Berechnungen vermuteter Verlustmechanismen durchgeführt. Folgende Effekte wurden dabei betrachtet:

- Trägheitsabscheidung im Einlasskrümmer,
- Impaktionsabscheidung an der oberen Verengung,
- Impaktionsabscheidung an der unteren Verengung,
- turbulente Inertialabscheidung in der Kapillare.

Berechnungsformeln hierzu wurden einem Übersichtsartikel von *Brockman* [7] entnommen.

Die berechneten Verluste als Funktion der Partikelgröße können **Bild 5** entnommen werden. Besonders abscheideträchtig sind demnach erwartungsgemäß die Strömungseingung vor der Kapillare und die Kapillare selbst. Hier herrschen sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Die Kapillare ist bei einem Durchfluss von 10 l/min nahezu kritisch. Deshalb können Abscheidemessungen mit vielen Probe-

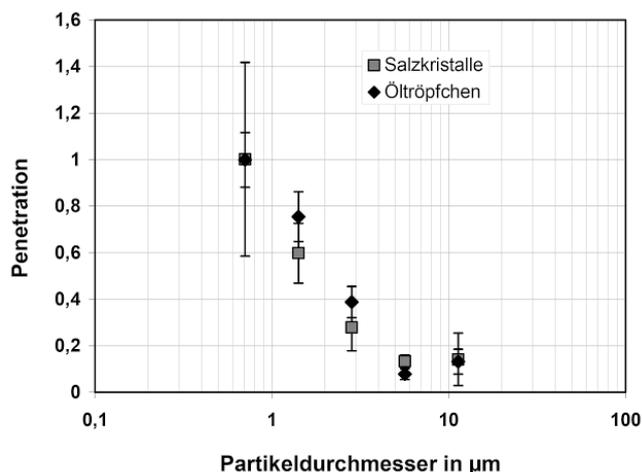


Bild 4. Penetration der Aerosolteilchen durch das Einsaugsystem des BS-12,5; Werte normiert auf Penetrationswerte für einen Partikeldurchmesser von 0,7 µm.

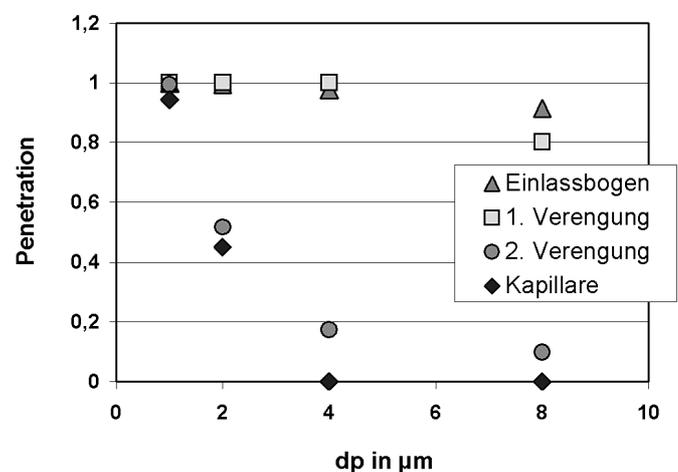


Bild 5. Berechnete Abscheideverluste im Zuführungsrohr zur Waschflaschenflüssigkeit.

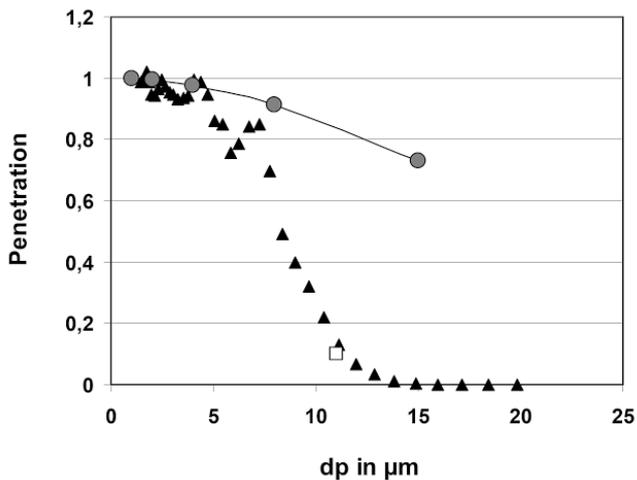


Bild 6. Penetrationskurve für einen glatten 90°-Krümmer. Dreiecke: Messungen mit Aerosol Particle Sizer (APS); Quadrat: Messung mit quasimonodispersen Öltröpfchen und Infrarotanalyse; Kreise: Theorie für Abscheidung im Krümmer.

nehmenden elektronischen Partikelzählern, wie z. B. dem Aerodynamic Particle Sizer, nicht durchgeführt werden. Zum Vergleich wurden weitere Untersuchungen mit einem glatten, um 90° gekrümmten Rohr (waagerechte Länge 70 mm, senkrechte Länge 250 mm, Innendurchmesser 9 mm, durchgängig) durchgeführt. Die Transferfunktion konnte hier wegen des geringen Druckabfalls der Probenahme mit dem Aerosol Particle Sizer (APS) gemessen werden. Für eine Partikelgröße von 11 µm wurde auch eine chemisch-analytische Messung des Abscheidegrads durchgeführt. Bild 6 zeigt, dass eine derartige Sonde Partikeln bis bis zu einer Größe von fast 10 µm relativ gut passieren lässt. Die Theorie unterschätzt allerdings den einzigen relevanten Abscheidemechanismus, die Inertialabscheidung in der 90°-Krümmung.

## 5 Zusammenfassung

Die über Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemittelte Einsaugeffizienz des Bioaerosolsammlers BS-10 folgt sehr gut der Definitionskurve des einatembaren Staubes. In den Konfigurationen für 10 und 12,5 l/min geht allerdings ein Großteil der eingesaugten Bioaerosole im Inneren der Probenahmeleitung verloren und erreicht die Sammelflüssigkeit nicht. Dies dürfte auch für andere am Markt befindliche Impinger gelten. Ein Einsatz dieses Sammelprinzips für alle Partikelgrößen der einatembaren Aerosolfraktion scheint nicht möglich. Die Einschränkung auf Aerosole bis zu einer Größe von wenigen Mikrometern, wie z. B. Bakterien, muss bei der Probenahme und Bewertung berücksichtigt werden.

### Literatur

- [1] Tyler, M.; Shipe, E. L.: Bacterial aerosol samplers, I. Development and evaluation of the All-Glass Impinger. *Appl. Microbiol.* 7 (1959), S. 337-349.
- [2] Hinds, W. C.: *Aerosol Technology: Properties, behaviour and measurement of airborne particles*, S. 226-227. New York: John Wiley Sons 1999.
- [3] DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel. Berlin: Beuth 1993.
- [4] Grinshpun, S. A.; Chang, C.-W.; Nevalainen, A.; Willeke, K.: Inlet characteristics of bioaerosol samplers. *J. Aerosol Sci.* 25 (1994) Nr. 8, S. 1503-1522.
- [5] Herstellerangaben SKC. <http://www.skinc.com/prod/225-9594.asp>
- [6] Tsai, P.-J.; Vincent, J. H.; Mark, D.; Maldonado, G.: Impaction model for the aspiration efficiencies of aerosol samplers in moving air under orientation-averaged conditions. *Aerosol Sci. Technol.* 22 (1995), S. 271-286.
- [7] Brockman, J. E.: Sampling and transport of aerosols. In: Willeke, K.; Baron, P. A. (Hrsg.): *Aerosol measurements*, S. 77-111. New York: Van Nostrand 1993.