

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA)

Abteilung:
Filtration & Aerosolforschung

Bliersheimer Straße 58-60
47229 Duisburg



Heinz Kaminski, Christof Asbach

Bericht Nr. UN2-210701-T5595900-112

Überprüfung des Trenngrades eines PM_{2,5}-Vorabscheiders für 2,3 m³/h mittels Messung mit polydisperssem Aerosol

Auftraggeber:
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Prof. Dr. Stefan Jacobi
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg

Duisburg, 18. Februar 2022

Zusammenfassung

Das Institut für Energie- und Umwelttechnik wurde vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie beauftragt, die Kalibrierung eines $PM_{2,5}$ -Impaktors zu überprüfen. Dafür wurden vom Hessischen Landesamt zwei $PM_{2,5}$ -Impaktoren (komplett) zur Verfügung gestellt.

Im Fokus der Untersuchungen stand die Beeinflussung des Trenngrades, die durch Variation des Abstands zwischen dem Düsenauslass und der Prallplatte hervorgerufen wird. Dazu wurde der $PM_{2,5}$ -Impaktor mit dem Abstand vom Düsenauslass zur Prallplatte von 8 mm untersucht. Dieser Abstand entspricht dem mittleren Abstand, der in Konstruktionsangaben der DIN EN 12341 angegeben wird. Die Toleranz dieses Abstands wird in der DIN EN 12341 mit 2 mm angegeben, sodass zusätzliche Untersuchungen mit Abständen vom Düsenauslass zur Prallplatte von 6 mm und 10 mm durchgeführt wurden.

Dazu wurde ein Versuchsstand bestehend aus $PM_{2,5}$ -Impaktor, Filtriersammler, Aerosolstromentnahme und einem Instrument zur Bestimmung von Partikelanzahlgrößenverteilungen aufgebaut. Mit einer definierten Partikelgenerierung wurde eine Staubbelastung der Luft simuliert und die Bestimmung des $PM_{2,5}$ -Impaktortrenngrads durchgeführt.

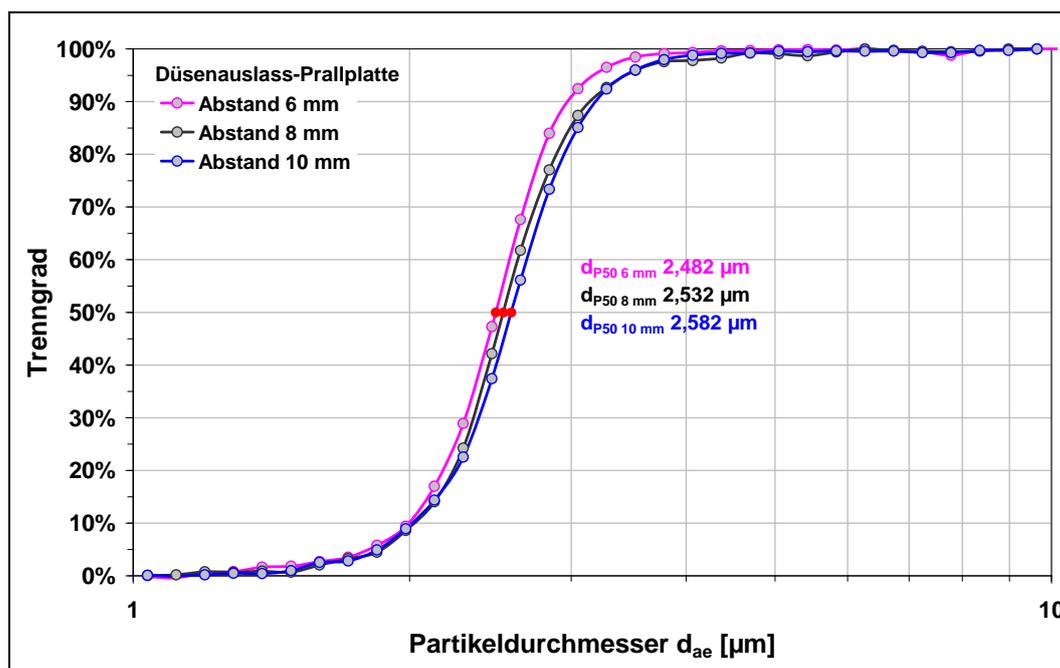
Um die Reduzierung des Abstands Düsenauslass-Prallplatte technisch umzusetzen, wurde eine zweite Prallplatte von 2 mm Dicke gefertigt, die zusätzlich in die vorhandene Prallplatte aufgelegt werden kann. Zur Vergrößerung des Abstands wurde ein 2 mm dicker Ring gefertigt, der zwischen Düsenplatte und oberem Impaktorgehäuseabsatz montiert wurde.

Zur Bewertung der Trenngradcharakteristik des $PM_{2,5}$ -Impaktors wurde jeder Abstand (Düsenauslass-Prallplatte) in jeweils 3 Messreihen nach einem zuvor festgelegten Messschema vermessen. Damit konnten pro Messreihe 30 Trenngradkurven ermittelt werden, wobei jede Trenngradkurve aus 52¹ Fraktionstrenngraden besteht. Durch Mittelung der Ergebnisse der Trenngradkurven an jedem einzelnen Fraktionstrenngrad wurde eine mittlere Trenngradkurve berechnet. Danach ergibt sich, dass die cut-offs (d_{p50})², die mit den drei verschiedenen Abständen ermittelt wurden, alle in einem Toleranzbereich von 2,5 µm ± 5 % (2,375-2,625 µm) liegen:

PM_{2,5} Impaktor			
Abstand zur Prallplatte	6 mm	8 mm	10 mm
Cut-off d_{p50}	2,48 µm	2,53 µm	2,58 µm
Steilheit $(d_{p84}/d_{p16})^{0,5}$	1,158	1,175	1,184

¹ Abhängig vom Größenmessbereich und der Größenauflösung des Partikelmessgeräts

² 50 %-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung der abgeschiedenen Partikelgrößenfraktionen (bzw. der kumulativen Trenngradkurve)



Weiterhin ergibt sich, dass die Trenngradkurve mit dem geringeren Abstand von 6 mm etwas steiler verläuft als beim Abstand von 8 mm. (siehe Zeile Steilheit in der Tabelle), die Trenngradkurve für den Abstand von 10 mm verläuft geringfügig flacher.

Zur Abschätzung der möglichen Auswirkungen der Trenngradabweichungen der drei Abstände untereinander, wurden Modellrechnungen mit standardisierten Verteilungsfunktionen durchgeführt, welche die Aerosolverteilung in der urbanen und ländlichen Umgebung widerspiegeln. Als Annahme wurde mit einer mittleren Partikeldichte von 1,6 g/cm^3 und einer Gesamtstaub-Massenkonzentration (TSP) von 50 $\mu g/m^3$ gerechnet.

Die Berechnungen ergaben, dass für eine Partikelgrößenverteilung, die einem urbanen Aerosol entspricht, bei Vergrößerung des Prallplattenabstands um 2 mm gegenüber dem in der Norm angegebenen mittleren Abstand von 8 mm, die $PM_{2,5}$ Konzentration von 16,375 $\mu g/m^3$ um 0,87 % (0,143 $\mu g/m^3$) überschätzt und bei Verringerung des Abstands um 2 mm die $PM_{2,5}$ Konzentration um 2,18 % (0,257 $\mu g/m^3$) unterschätzt wird.

Bei Betrachtung der Verteilung, die einem ländlichen Aerosol entspricht, ergibt sich ausgehend von einer $PM_{2,5}$ Konzentration von 10,416 $\mu g/m^3$ bei 8 mm Prallplattenabstand eine Überschätzung von 1,25 % (0,131 $\mu g/m^3$) bei 10 mm bzw. eine Unterschätzung von 3,93 % (0,409 $\mu g/m^3$) bei 6 mm Abstand von Düsenauslass zur Prallplatte.

Summary

The Institute of Energy and Environmental Technology (IUTA) was commissioned by the Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology (HLNUG) to investigate the separation characteristic of a $PM_{2.5}$ impactor. For this purpose, two $PM_{2.5}$ impactors (complete) were provided by the Hessian Agency.

The focus of the investigations was on the influence of the efficiency of separation caused by varying the distance between the nozzle outlet and the impactor plate. For this purpose, the $PM_{2.5}$ impactor was investigated with the distance from the nozzle outlet to the impactor plate of 8 mm. This distance corresponds to the average distance given in design specifications of DIN EN 12341. The tolerance of this distance is specified in DIN EN 12341 as 2 mm, so that additional investigations were carried out with distances from the nozzle outlet to the impactor plate of 6 mm and 10 mm.

A test rig was set up consisting of a $PM_{2.5}$ impactor, an isokinetic sampling probe, a particle sizer and a low-volume-sampler to control the required flow rate. A defined particle generation was used to simulate a dust load in the air and to determine the $PM_{2.5}$ impactor separation efficiency.

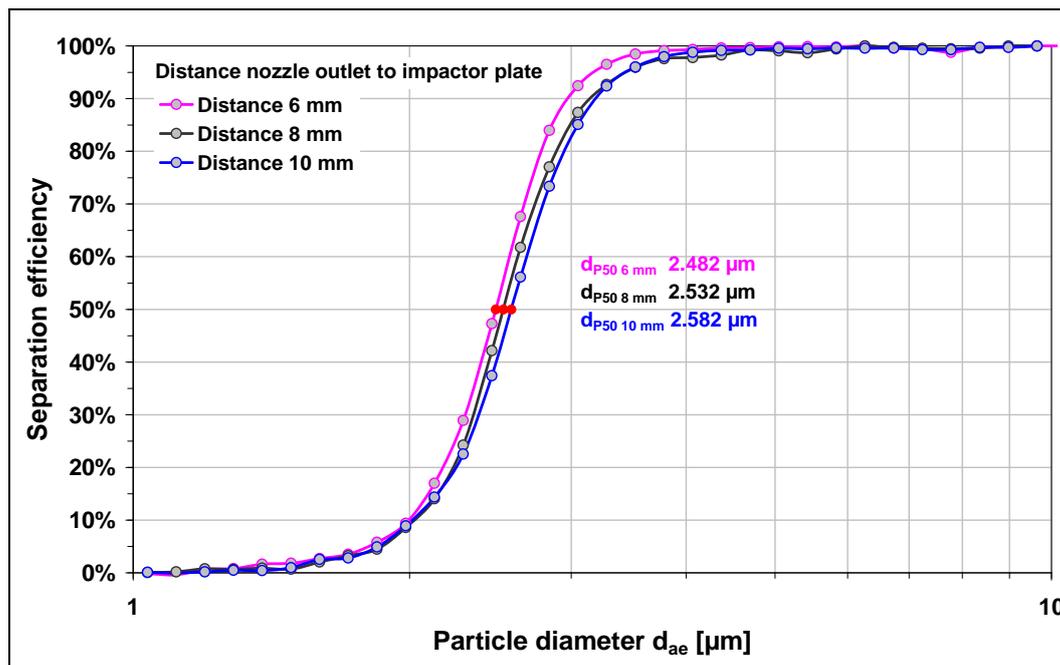
In order to reduce of the distance between the nozzle outlet and the impactor plate, a second impactor plate with a thickness of 2 mm was manufactured, which can be placed on top of the existing impactor plate. In the opposite, to increase the distance, a 2 mm thick ring was manufactured, which can be mounted between the nozzle plate and the upper part of the impactor housing.

To evaluate the separation efficiency characteristics of the $PM_{2.5}$ impactor, each distance (nozzle outlet - impactor plate) was measured in 3 measurement series according to a previously defined measurement scheme. Thus, 30 separation efficiency curves could be determined per measurement series, each separation efficiency curve consisting of 52³ fractional separation efficiencies. A mean separation efficiency curve was calculated by averaging the results for each of the particle size classes of the efficiency curves. The results show that the cut-off diameters (d_{p50})⁴ for the three different spacings agree within in tolerance range of 2.5 $\mu\text{m} \pm 5\%$ (2.375-2.625 μm):

PM_{2.5} Impactor			
Distance to impactor plate	6 mm	8 mm	10 mm
Cut-off d_{p50}	2.48 μm	2.53 μm	2.58 μm
Slope $(d_{p84}/d_{p16})^{0.5}$	1.158	1.175	1.184

³ Depending on size range and size resolution of the particle sizer

⁴ 50 % value of the cumulative frequency distribution of the deposited particle size fractions



Furthermore, it can be seen that the slope of the separation efficiency curve is somewhat steeper with the smaller spacing of 6 mm than with the spacing of 8 mm. (see line slope in the table), the separation efficiency curve for the distance of 10 mm is slightly less steep.

To estimate the possible effects of the separation efficiency deviations of the three distances among each other, model calculations with standardized distribution functions were carried out, which reflect an assumption to the mean aerosol distribution in the urban and rural environment. A mean particle density of $1.6\ g/cm^3$ and a total suspended particle mass (TSP) concentration of $50\ \mu g/m^3$ were assumed.

For a particle size distribution corresponding to an urban aerosol and an increase of the impactor plate distance by 2 mm compared to the mean distance of 8 mm specified in the standard, the calculations showed that the $PM_{2.5}$ concentration of $16.375\ \mu g/m^3$ is overestimated by 0.87% ($0.143\ \mu g/m^3$), a decrease by 2 mm the $PM_{2.5}$ concentration is underestimated by 2.18% ($0.257\ \mu g/m^3$).

Considering the distribution corresponding to a rural aerosol, based on a $PM_{2.5}$ concentration of $10.416\ \mu g/m^3$ at 8 mm impactor plate distance, there is an overestimation of 1.25 % ($0.131\ \mu g/m^3$) at 10 mm and an underestimation of 3.93 % ($0.409\ \mu g/m^3$) at 6 mm distance from nozzle outlet to impactor plate.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Summary	4
1 Einleitung	7
2 $PM_{2,5}$-Impaktor	7
3 Versuchsvorbereitungen	9
3.1 Isokinetische Probenahme	9
3.2 Übergang Impaktor - Filtriersammler	10
4 Messgeräte und Qualitätssicherung	11
4.1 Partikelmessgerät	11
4.2 Partikelgenerator	11
4.3 Partikelmaterial	11
4.4 Filtriersammler	11
4.5 Qualitätssicherung	12
4.5.1 Kalibrierung Partikelmessgerät	12
4.5.2 Überprüfung Volumenstrom	12
4.5.3 Reinigung	12
5 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung	13
5.1 Auswertung	14
6 Ergebnisse	16
6.1 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 8 mm	16
6.2 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 10 mm	18
6.3 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 6 mm	20
7 Modellrechnungen	23
8 Literatur	25

1 Einleitung

Das Institut für Energie- und Umwelttechnik wurde vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie beauftragt, die Kalibrierung eines $PM_{2,5}$ -Impaktors zu überprüfen. Dafür wurden vom Hessischen Landesamt zwei $PM_{2,5}$ -Impaktoren (komplett) zur Verfügung gestellt. Die Impaktoren sind bauseitig derart gefertigt, dass ein Austausch der Düsen aufgrund von Steckverbindungen leicht möglich ist.

Im Fokus der Untersuchungen stand die Beeinflussung des Trenngrades, die durch Variation des Abstands Düsenauslass zu Prallplatte hervorgerufen wird. Dazu wurde der $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Abstand Düsenauslass zu Prallplatte von 8 mm untersucht. Die Toleranz dieses Abstands wird in der DIN EN 12341 mit 2 mm angegeben, so dass zusätzliche Untersuchungen mit Abständen von Düsenauslass zu Prallplatte von 6 mm und 10 mm durchgeführt wurden.

Der Impaktor wurde für einen Luftdurchsatz von 2,3 m³/h konzipiert und sollte mit atmosphärischem Aerosol überprüft werden. Dazu wurde ein Teststand bestehend aus Impaktor, Filtriersammler, Aerosolstromentnahme und einem Instrument zur Bestimmung von Partikelanzahlgrößenverteilungen aufgebaut. Mit einer definierten Partikelgenerierung wurde eine Staubbelastung der Luft simuliert und die Bestimmung des $PM_{2,5}$ -Impaktortrenngrads durchgeführt.

2 $PM_{2,5}$ -Impaktor

Vom Hessischen Landesamt wurden zwei Impaktoren geliefert. Beide Impaktoren sind für einen cut-off₂ von 2,5 µm aerodynamischen Durchmessers ($PM_{2,5}$) bei einem Volumenstrom von 2,3 m³/h mit jeweils acht Düsenrohren ausgelegt. Die dafür derzeit gültige Norm ist die DIN EN 12341 [1]. Da die Düsenrohre nur eingesteckt sind, ist ein Wechsel der Düsenrohre relativ einfach möglich.

Die eingesteckten Düsenrohre weisen eine Länge von 65,7 mm auf; mit der abgesetzten Prallplatte ergibt sich ein Abstand zwischen Düsenausgang und Prallplatte von 8 mm.

Die technische Umsetzung zur Reduzierung des Abstands Düsenauslass-Prallplatte auf 6 mm wurde über eine zusätzlich angefertigte Prallplatte von 2 mm Dicke erreicht, die auf die bereits vorhandene Prallplatte aufgelegt werden kann (siehe Abbildung 2). Somit verringert sich der Abstand entsprechend auf 6 mm.

Da die Düsenplatte des $PM_{2,5}$ -Impaktors auf den oberen Absatz des Gehäuses geschoben wird, wurde ein 2 mm dicker Ring gefertigt, der auf dem oberen Absatz liegt und somit die Düsenplatte nach dem Zusammenschieben höher stellt (siehe Abbildung 3). Damit ergibt sich ein Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 10 mm.

Konstruktionszeichnungen eines Standard-Probeneinlasses für PM_{10} und $PM_{2,5}$

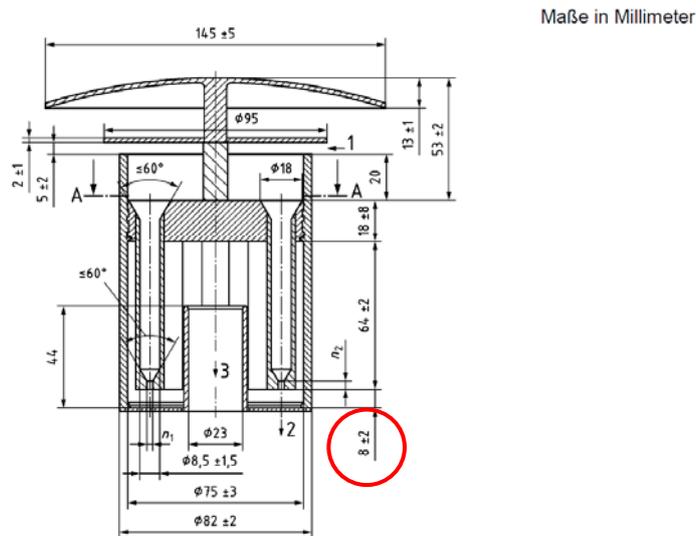


Abbildung 1: Konstruktionsmerkmale für einen $PM_{2,5}$ -Impaktors (LVS) nach DIN EN 12341 [1]



Abbildung 2: Links: Zusammengesetzter Impaktor, Mitte: Abstandsring und Prallplatte zur Vergrößerung bzw. Reduzierung des Abstands Düsenausgang-Prallplatte, Rechts: Eingelegte zusätzliche Prallplatte

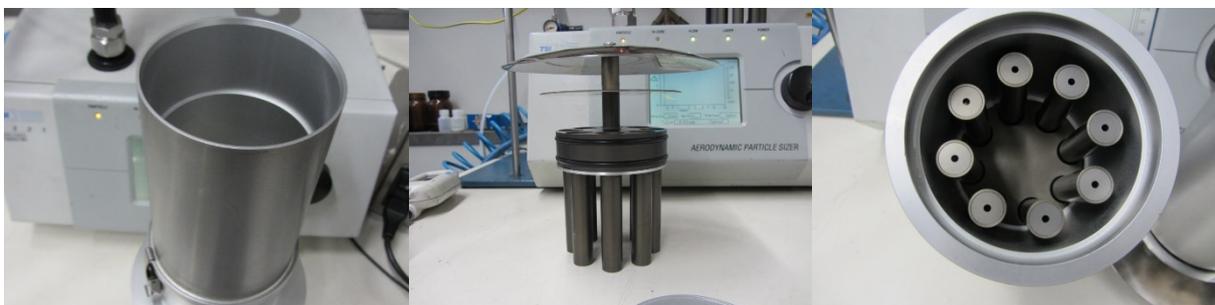


Abbildung 3: Aufgeschobener Abstandsring an der Düsenplatte (Mitte). Diese Düsenplatte wird auf den oberen Absatz des Impaktorgehäuses geschoben (links), montierte Düsenplatte mit Ansicht von unten (rechts)

3 Versuchsvorbereitungen

3.1 Isokinetische Probenahme⁵

Zur Bestimmung der Abscheidecharakteristik des Impaktors musste ein Teilvolumenstrom hinter dem Impaktor entnommen werden, welcher zum Partikelmessgerät geführt wurde. Dabei war zu beachten, dass die Teilvolumenstromentnahme, bezogen auf den wirksamen Querschnitt der Entnahmesonde, isokinetisch erfolgte. Dieses stellt sicher, dass die Trennlinie zwischen dem Haupt- und Teilstrom für Partikel und Gas zusammenfallen. Erfolgt die Teilvolumenstromentnahme nicht isokinetisch, kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- **Teilstromgeschwindigkeit > Hauptstromgeschwindigkeit**
Ist die Teilstromgeschwindigkeit größer als die Hauptstromgeschwindigkeit können Partikel ab einem bestimmten aerodynamischen Durchmesser durch Trägheitseffekte den Strömungslinien des Teilstroms vor der Entnahmesonde nicht mehr folgen und werden von der Sonde und vom Teilstrom nicht erfasst. Die Folge ist eine Verfälschung der Partikelgrößenverteilung und der mittlere Partikeldurchmesser der gemessenen Verteilung verschiebt sich zu kleineren Werten.
- **Teilstromgeschwindigkeit < Hauptstromgeschwindigkeit**
Ist die Teilstromgeschwindigkeit kleiner als die Hauptstromgeschwindigkeit können Partikel ab einem bestimmten aerodynamischen Durchmesser durch Trägheitseffekte den Strömungslinien des Hauptstroms vor der Entnahmesonde nicht mehr folgen und gelangen in die Sonde. Die Folge ist eine Verfälschung der Partikelgrößenverteilung und der mittlere Partikeldurchmesser der gemessenen Verteilung verschiebt sich zu größeren Werten.

Grundlage für die Auslegung der isokinetischen Probenahmesonde waren die Volumenströme des Impaktors und des Partikelmessgeräts sowie der Innendurchmesser des Luftströmungskanals zwischen Impaktor und Partikelmessgerät/Filtriersammler. Der erforderliche Sondeninnendurchmesser ergibt sich mit den verwendeten Auslegungsdaten aus Tabelle 1 zu 9,4 mm. Die Anfertigung der Entnahmesonde erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [2].

⁵ Die Anfertigung der Probenahmerohrs/sonde erfolgte bereits für eine frühere Untersuchung im Auftrag des HLNUG zur Vermessung eines PM_{10} -Impaktors und ist hier zum besseren Verständnis und der Vollständigkeit noch einmal dargestellt.

Luftströmungsrohr Impaktor-Partikelmessgerät		
Rohrdurchmesser _{innen}	26 mm	
Volumenstrom	2,3 m ³ /h	38,33 l/min
Strömungsgeschwindigkeit	1,2 m/s	
Teilstromentnahmesonde		
Volumenstrom	0,3 m ³ /h	5 l/min
Strömungsgeschwindigkeit	1,2 m/s	
erforderlicher Sondendurchmesser _{innen}	9,4 mm	

Tabelle 1: Auslegungsdaten für die Teilstromentnahme

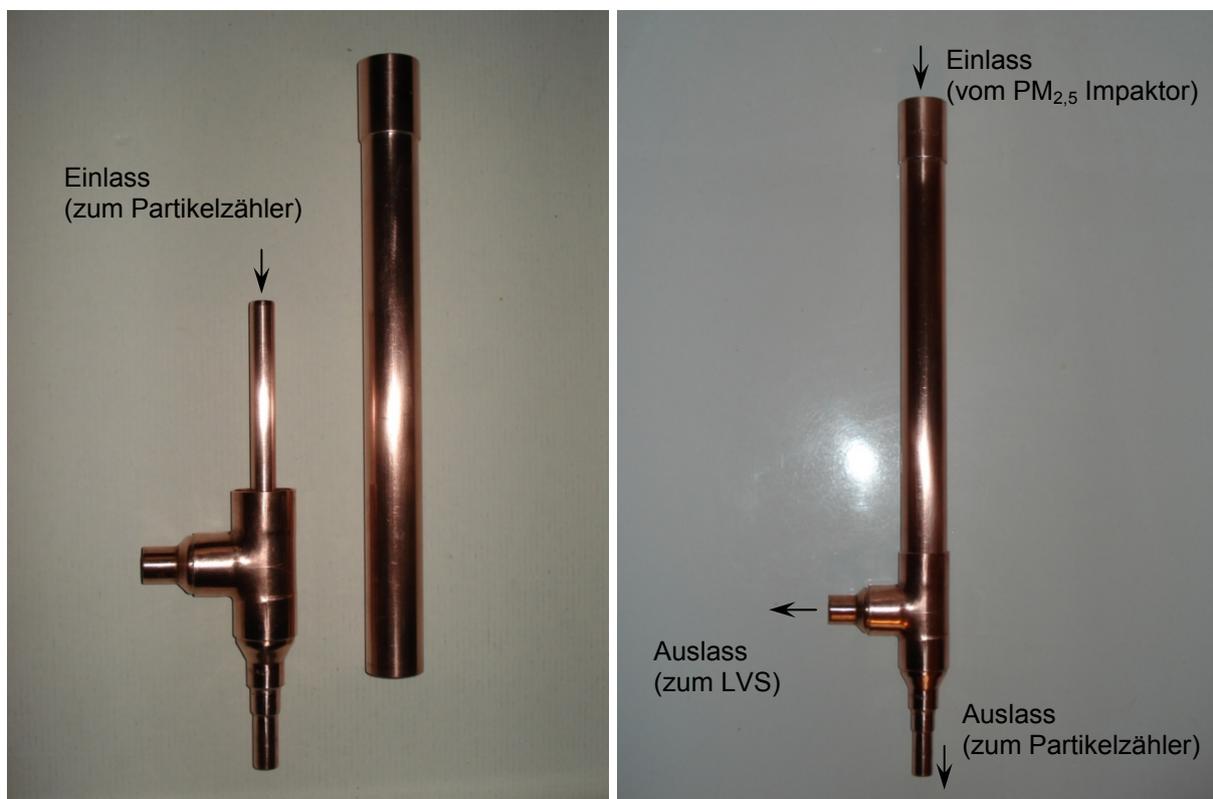


Abbildung 4: Fotos des angefertigten Luftströmungsrohrs mit isokinetischer Probenahmesonde (links: demontiert, rechts: komplett verlötet)

3.2 Übergang Impaktor - Filtriersammler

Der gelieferte $PM_{2,5}$ -Impaktor hat als Luftauslass einen Anschluss mit einem Innendurchmesser von 30 mm. Der angefertigte Luftströmungskanal, in dem die isokinetische Probenahmesonde platziert ist, wurde am oberen Einlass mit einem Adapter von 30 mm Außendurchmesser versehen, sodass der Impaktor auf diesen Luftströmungskanal aufgesteckt werden konnte und mittels O-Ring abgedichtet wurde.

4 Messgeräte und Qualitätssicherung

4.1 Partikelmessgerät

Als Partikelmessgerät wurde ein Instrument zur Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung, das Partikelgrößenpektrometer APS 3321 der Firma TSI, USA, verwendet. Dieser Partikelzähler misst den aerodynamischen Durchmesser der Partikel unter Ausnutzung der Partikelträgheit. Dies wird durch eine Flugzeitmessung der Partikel durch das Messvolumen ermöglicht. Für nähere Informationen zum Messprinzip wird auf die Literatur [3] verwiesen. Das APS 3321 misst die Partikelanzahl sowie die Partikelgröße im Bereich von 0,5 µm und 20 µm, die in insgesamt 52 Größenkanälen differenziert erfasst werden (32 Kanäle pro Dekade). Das APS benötigt einen Volumenstrom von 5 l/min.

4.2 Partikelgenerator

Um eine ausreichende und konstante Staubbelastung der Luft zu erzielen, wurde der Feststoffdosierer RBG-1000 der Firma Palas[®] GmbH, Karlsruhe, eingesetzt. Dieser dient der gleichmäßigen, kontinuierlichen und reproduzierbaren Bereitstellung von polydispersen Feststoffaerosolen aus Haufwerken. Dabei wird aus einem zylindrischen Feststoffbehälter mithilfe eines Kolbens das verdichtete Haufwerk (Dosiergut) einer rotierenden Bürste zugeführt. Diese trennt eine definierte Feststoffmenge ab, welche dann im Dosierkopf von der Luftströmung abtransportiert und gleichzeitig dispergiert wird. Als Dosiergut eignen sich nichtklebende Pulver und Stäube von <0,1 µm bis 100 µm [4].

4.3 Partikelmaterial

Für die Trenngradüberprüfung wurde als Teststaub Arizona Staub A2 nach ISO 12103-1 [5] der Firma KSL Staubtechnik, Launing, verwendet. Arizona Staub besteht aus mineralischem Siliziumdioxid/Quarz (> 97 %) mit anderen Oxiden und weist eine mittlere Dichte von 2,65 g/cm³ auf. Es bietet neben der guten Handhabbarkeit den Vorteil eines nichttoxischen Materials.

4.4 Filtriersammler

Der für den $PM_{2,5}$ -Impaktor benötigte Luftvolumenstrom von 2,3 m³/h wurde mithilfe des Low-Volume-Sammlers LVS 3, Derenda [6] angesaugt. Dieser Filtriersammler ist in den VDI-Richtlinien 2463 Blatt 7 [7] und Blatt 11 [8] beschrieben und in der TA Luft als Referenz für Schwebstaubüberwachung aufgeführt. Allerdings wurde der LVS 3 mit einem Volumenstrom von 2,0 m³/h (33,33 l/min) betrieben, da zusätzlich 0,3 m³/h (5 l/min) vom Partikelmessgerät angesaugt wurden.

4.5 Qualitätssicherung

4.5.1 Kalibrierung Partikelmessgerät

Vor Beginn des Messprogramms wurde die Kalibrierung des APS 3321 mithilfe von Polystyrol-Latex (PSL-) Kalibrierpartikeln und der angesaugte Volumenstrom mithilfe eines Bubble Flowmeter (Gilibrator 2, Sensodyne) überprüft. Die Überprüfung erfolgte mit PSL-Partikeln der Partikelgröße 2,54 μm (geometrischer Partikeldurchmesser). Mit einer Partikeldichte der Polystyrolpartikel von 1,049 g/cm^3 ergibt sich rein rechnerisch ein aerodynamischer Partikeldurchmesser von 2,601 μm . Die Kalibrierpartikel wurden vom APS im entsprechenden Größenintervall von 2,55-2,74 μm mit dem mittleren Durchmesser von 2,64 μm eingeordnet (siehe Abbildung 5, links). Die Rohdatenanalyse ergab die Einordnung in APS-Bin-Number 256 (2,603 μm ; siehe Abbildung 5, rechts) und damit eine Bestätigung der Kalibriereinstellungen.

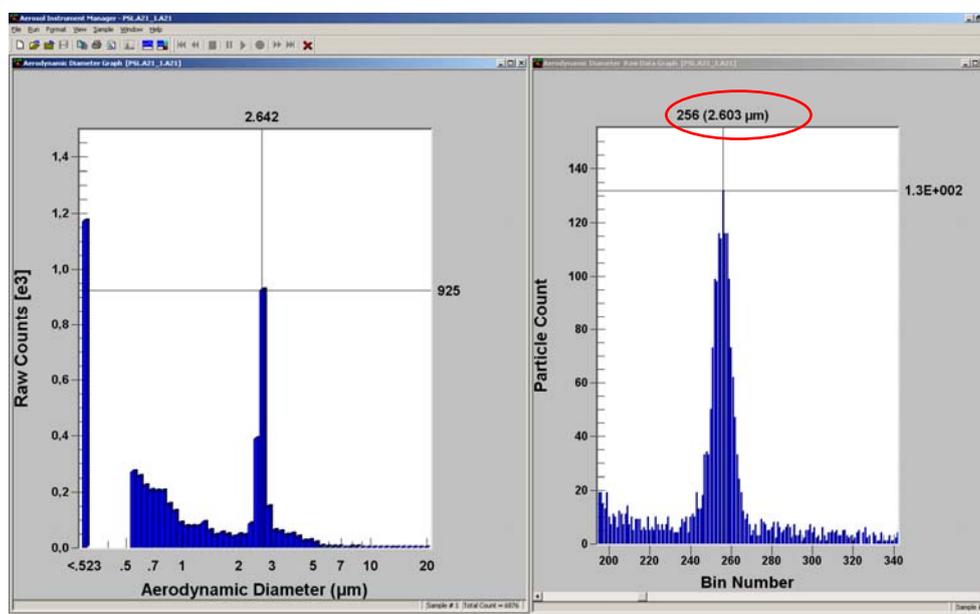


Abbildung 5: Kalibrierüberprüfung des APS 3321

4.5.2 Überprüfung Volumenstrom

Vor jeder Messreihe wurden die Volumenströme mittels Thermal Mass Flowmeter (TSI Model 3063) überprüft und ggf. nachjustiert.

4.5.3 Reinigung

Nach jeder Messreihe wurden die $PM_{2,5}$ -Impaktor demontiert und mittels Druckluft und Reinigungstuch gereinigt. Die Düsenrohre wurden demontiert, im Ultraschallbad von anhaftenden Staubpartikeln befreit und mit Druckluft getrocknet. Die Prallplatte wurde vor jeder Messreihe dünn mit Vaseline gefettet und nach der Messreihe gesäubert.

5 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Abscheidecharakteristik des $PM_{2,5}$ -Impaktors wurde im Labor des IUTA ein Versuchsstand aufgebaut (siehe Abbildung 6). Dieser Versuchsaufbau bestand aus dem $PM_{2,5}$ -Impaktor, dem Strömungsrohr zum Partikelzähler mit isokinetischer Probenahmesonde, dem Partikelzähler mit Auswerteeinheit (Laptop), einem Partikelgenerator zur definierten Staubbelastung und einem Low-Volume-Filtriersammler zur Einstellung des benötigten Volumenstroms. Die Aufgabe des Teststaubs erfolgte in 30 cm Abstand vom $PM_{2,5}$ -Impaktor.

Zur Bewertung der Abscheidecharakteristik des $PM_{2,5}$ -Impaktors wurde ein größenfraktionsspezifischer Referenzwert ermittelt, der die natürliche, geometrische, d. h. strömungsmechanisch aufgeprägte Abscheidecharakteristik des Impaktors ohne Prallplatte und ohne Düsen widerspiegelt. Zunächst wurde daher die Gesamtpartikelanzahl der Laborluft mit einem modifizierten $PM_{2,5}$ -Impaktor ohne Prallplatte gemessen, aus dem zuvor die Düsen entfernt wurden. Anschließend erfolgte die Messung mit dem zu überprüfenden $PM_{2,5}$ -Impaktor mit eingesteckten Düsen und Prallplatte.

Eine Messreihe wurde wie folgt durchgeführt:

1. Einstellen bzw. Überprüfen des Volumenstroms.
2. Start der Staubdispergierung, anschließende Wartezeit 5 min.
3. Insgesamt 61 alternierende Messungen mit einer Messzeit von jeweils 30 s:
 - (a) mit $PM_{2,5}$ -Impaktor **ohne Düsen und Prallplatte** (Testaerosol **oDP**), anschließend Wechsel des $PM_{2,5}$ -Impaktors und
 - (b) mit $PM_{2,5}$ -Impaktor **mit Düsen und Prallplatte** (Testaerosol **mDP**), anschließend Wechsel des $PM_{2,5}$ -Impaktors.

Diese alternierenden Messungen wurden 30-mal wiederholt und am Ende immer durch eine Messung mit dem $PM_{2,5}$ -Impaktor ohne Düsen und Prallplatte abgeschlossen. Jede Messreihe bestand damit aus 61 einzelnen Messungen. Diese ergaben 61 Partikelgrößenverteilungskurven mit jeweils 52 Partikelgrößenklassen (entsprechend den Größenkanälen des Partikelmessgeräts) im Größenbereich von 0,5-20 μm . Für jeden Abstand Düsenauslass-Prallplatte wurden jeweils 3 Messreihen durchgeführt.

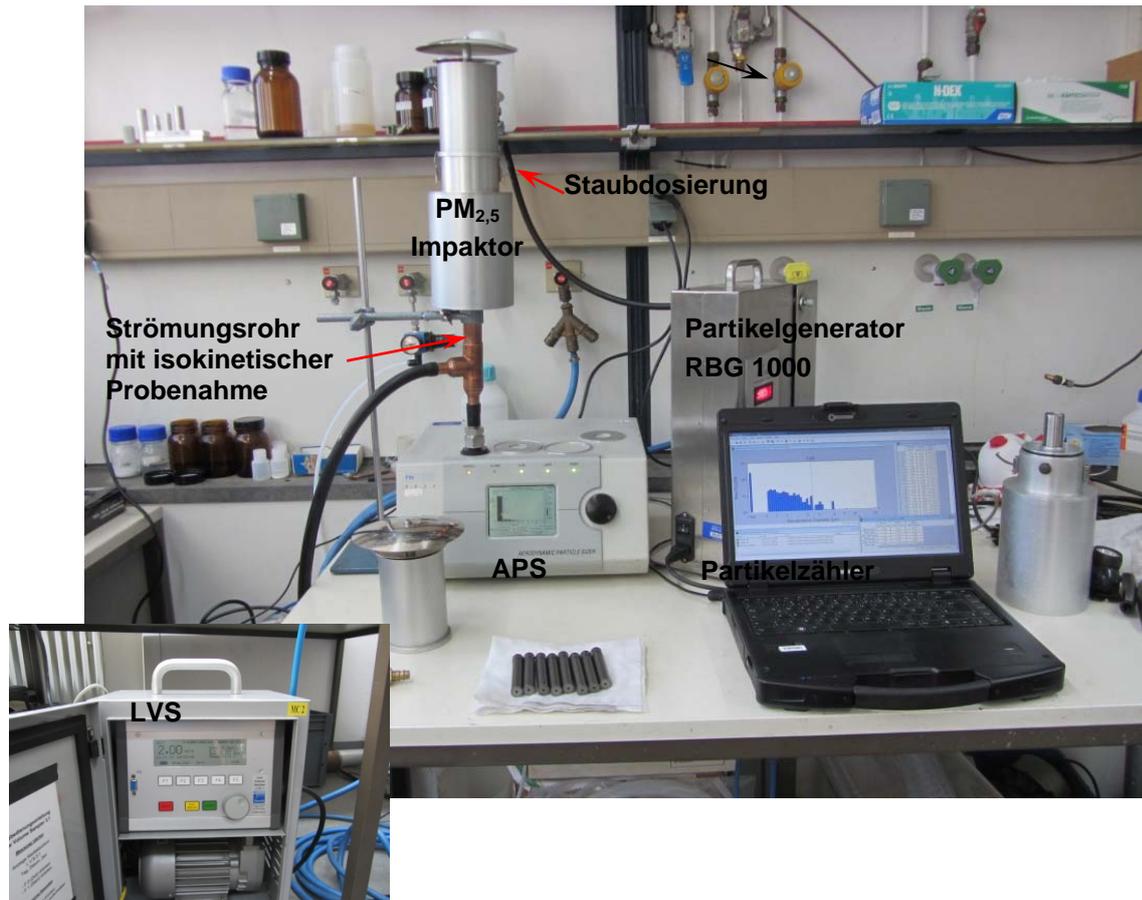


Abbildung 6: Versuchsstandanordnung im Labor

5.1 Auswertung

Aus den Partikelanzahlen in den entsprechenden Größenkanälen bei den Messungen ohne und mit Düsen und Prallplatte wurde der Fraktionstrenngrad der jeweiligen Größenklasse mit folgender Gleichung ermittelt:

$$\text{Fraktionstrenngrad}_{n,j} = 1 - \frac{N_{n,i} \text{ Testaerosol } mDP}{N_{n,i} \text{ Testaerosol } oDP} = 1 - \frac{N_{n,i}}{\frac{N_{n,i-1} + N_{n,i+1}}{2}}$$

$N_{n,i} \text{ Testaerosol } mDP$ Partikelanzahl der Messung mit Düsen und Prallplatte (nicht abgeschiedene Partikel) in der Größenklasse n und für die Messung i

$N_{n,i} \text{ Testaerosol } oDP$ Partikelanzahl der Messung ohne Düsen und Prallplatte in der Größenklasse n und für die Messung i

n Laufindex der Partikelgrößenklasse ($1 \leq n \leq 52$)

j Laufindex der Trenngradkurve ($1 \leq j \leq 30$)

i Laufindex der Messung: $i = 2 \cdot j$

Bei der Berechnung der jeweiligen Fraktionstrenngrade wurde also ein Zyklus aus drei Messungen herangezogen, der aus einer Messung ohne Düsen und Prallplatte, einer Messung mit Düsen und Prallplatte und abschließend wieder einer Messung ohne Düsen und Prallplatte bestand. Der Referenzwert (Testaerosol oDP) für jede Messung mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) wurde dabei aus dem Mittelwert der beiden einhüllenden Messungen ohne Düsen und Prallplatte des Zyklus gebildet.

Dies ergab 52 Fraktionstrenngrade, die jeweils eine Trenngradkurve bilden. Somit konnten bei den Messreihen jeweils 30 Trenngradkurven ermittelt werden. Aus diesen Trenngradkurven wurde anschließend für die jeweilige Messreihe eine mittlere Gesamttrenngradkurve berechnet.

Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu:

$$\text{Steilheit} = \left(\frac{d_{p84}}{d_{p16}} \right)^{0,5} .$$

d_{p84} Partikeldurchmesser bei 84 % Abscheidung

d_{p16} Partikeldurchmesser bei 16 % Abscheidung

6 Ergebnisse

6.1 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 8 mm

In Abbildung 7 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem $PM_{2,5}$ -Impaktor ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP, Abstand 8 mm) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen gebildet worden.

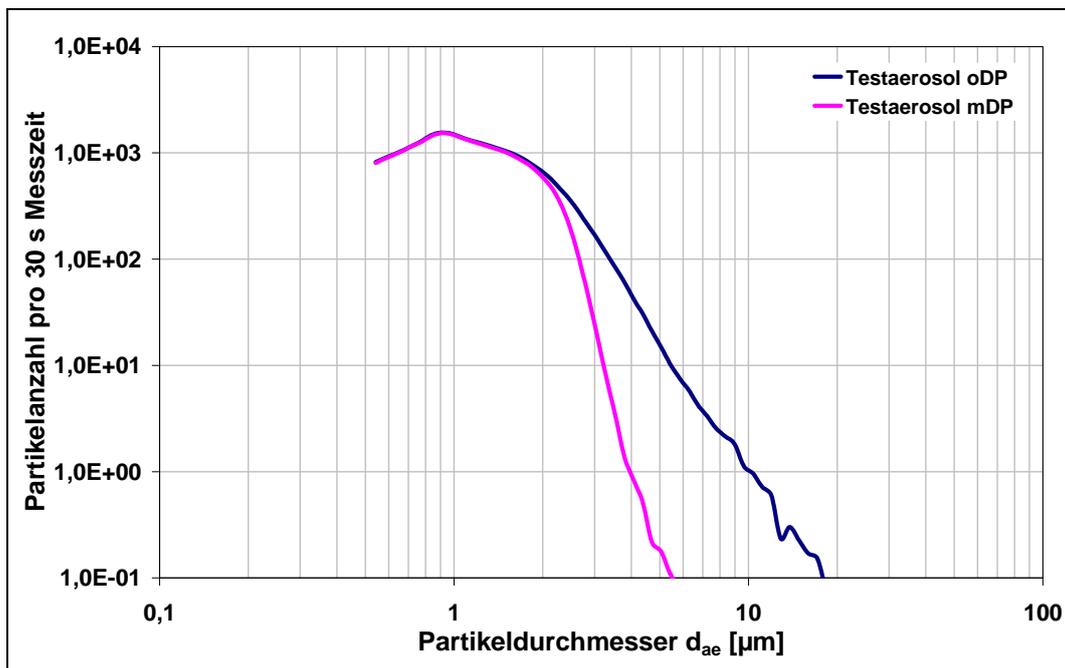


Abbildung 7: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für Prallplattenabstand 8 mm

In Abbildung 8 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 8 mm aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs 2,37-2,74 μm d_{p50} -Werte von 2,529-2,536 μm .

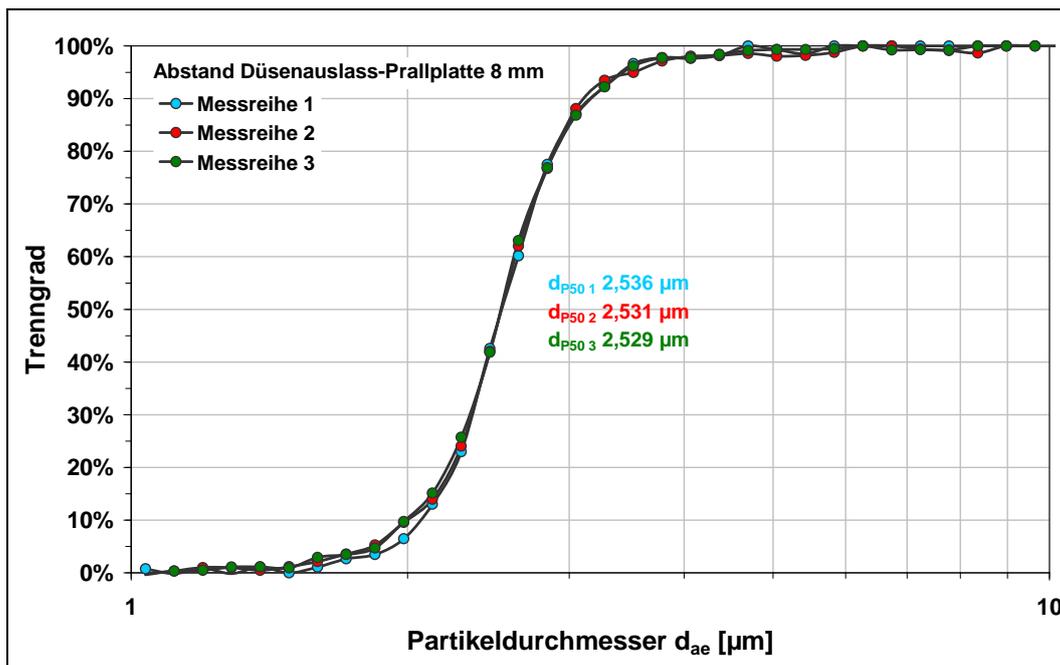


Abbildung 8: Trenngradkurven für den PM_{2,5}-Impaktor mit Prallplattenabstand 8 mm der 3 Messreihen (Anmerkung: Dargestellt ist der Partikelgrößenbereich 1-10 µm und somit jeweils nur 32 Fraktionstrenngrade (Punkte) der einzelnen Trenngradkurven, dies gilt auch für nachfolgende Trenngradkurvendiagramme.)

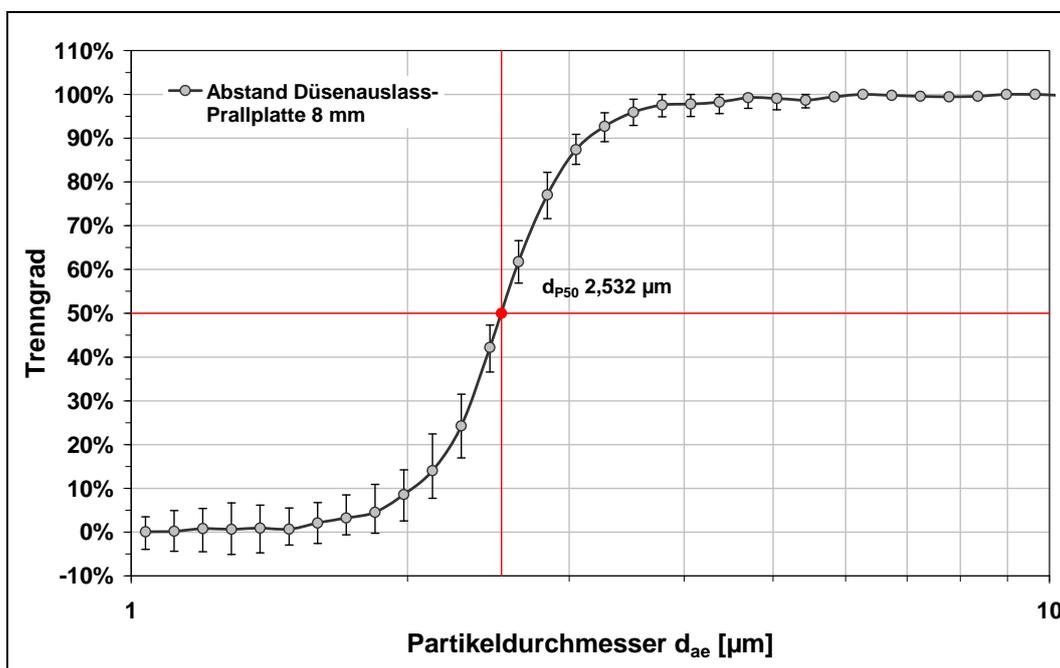


Abbildung 9: Gemittelte Trenngradkurve für den PM_{2,5}-Impaktor mit Prallplattenabstand 8 mm, die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 8 mm ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{p50}=2,53 \mu\text{m}$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu 1,18.

	d_{p50}	Steilheit
Messreihe 1	2,536 μm	1,170
Messreihe 2	2,531 μm	1,173
Messreihe 3	2,529 μm	1,82
Gesamt	2,532 μm	1,175

Tabelle 2: Zusammenfassung des d_{p50} für den Prallplattenabstand von 8 mm

6.2 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 10 mm

In Abbildung 10 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem PM_{2,5}-Impaktor ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem PM_{2,5}-Impaktor mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP, Abstand 10 mm) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen des Düsenatzes gebildet worden.

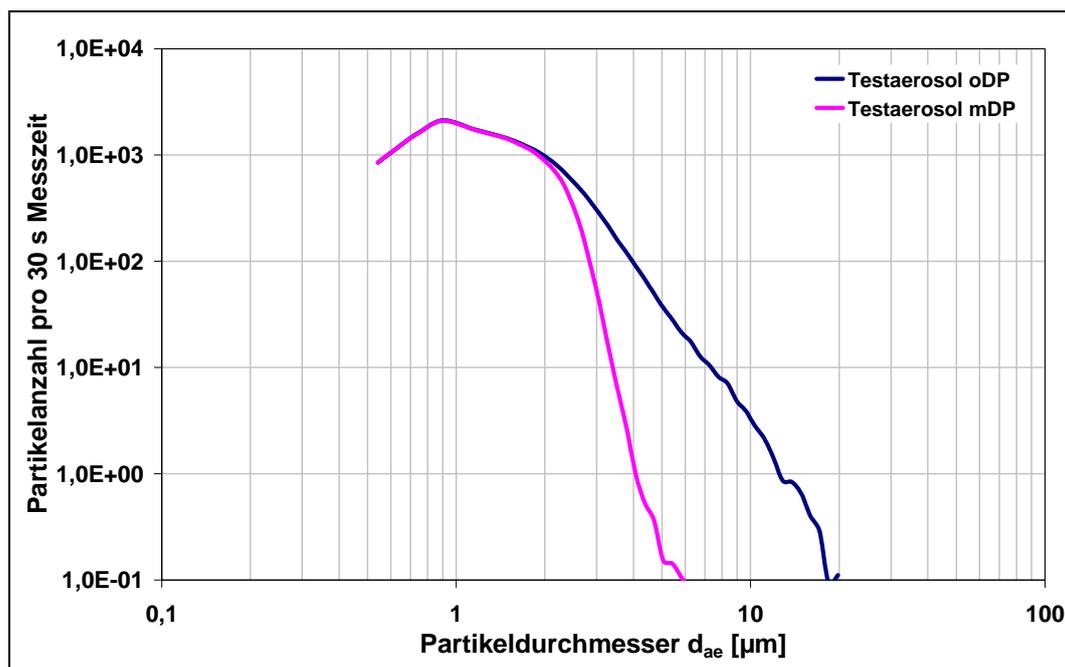


Abbildung 10: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für Prallplattenabstand 10 mm

In Abbildung 11 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den PM_{2,5}-Impaktor mit Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 10 mm aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs 2,37-2,74 μm d_{p50} Werte von 2,579-2,584 μm .

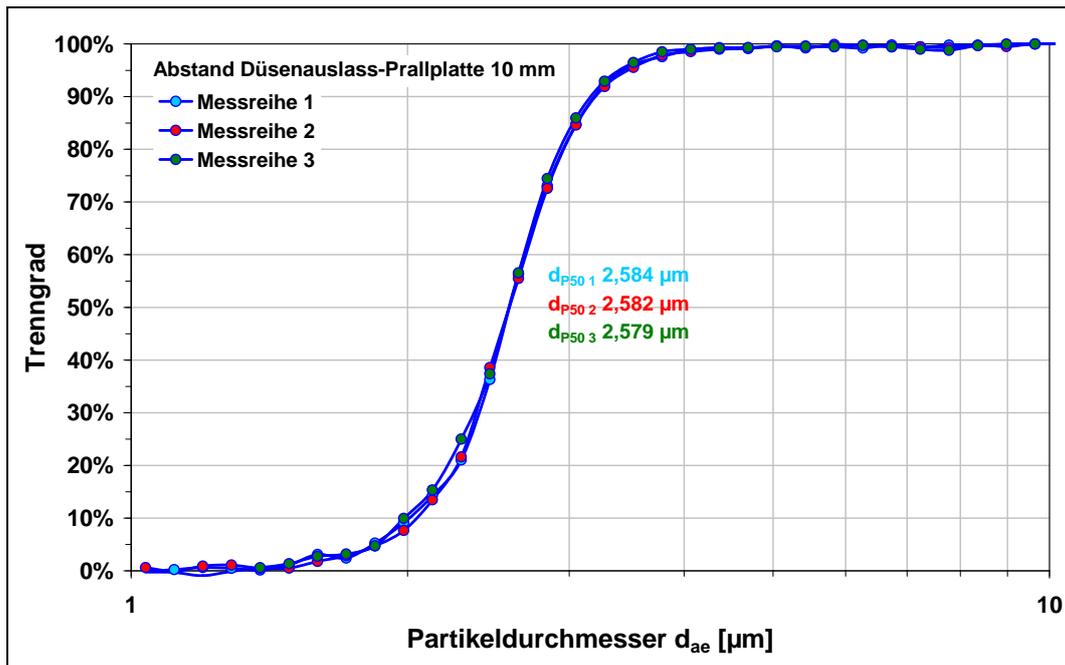


Abbildung 11: Trenngradkurven für den $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Prallplattenabstand 10 mm der 3 Messreihen

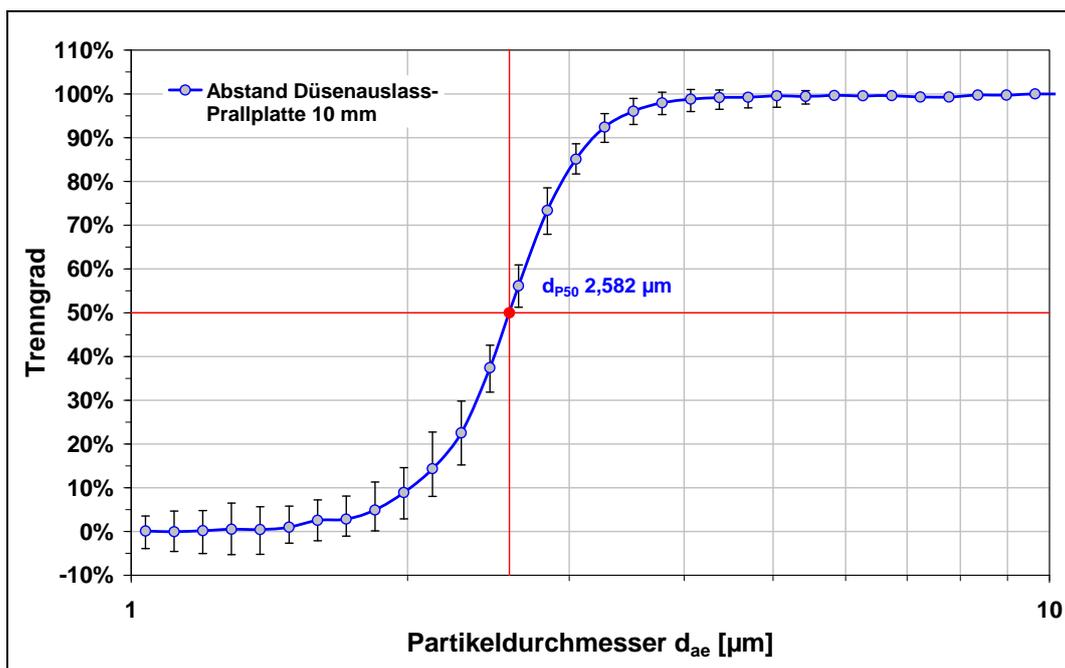


Abbildung 12: Gemittelte Trenngradkurve für den $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Prallplattenabstand 10 mm, die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 10 mm ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{P50} = 2,58 \mu m$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu 1,18.

	d_{p50}	Steilheit
Messreihe 1	2,584 μm	1,183
Messreihe 2	2,582 μm	1,181
Messreihe 3	2,579 μm	1,187
Gesamt	2,582 μm	1,184

Tabelle 3: Zusammenfassung des d_{p50} für den Prallplattenabstand von 10 mm

6.3 Abstand Düsenauslass-Prallplatte 6 mm

In Abbildung 13 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem $PM_{2,5}$ -Impaktor ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP, Abstand 6 mm) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen des Düsenatzes gebildet worden.

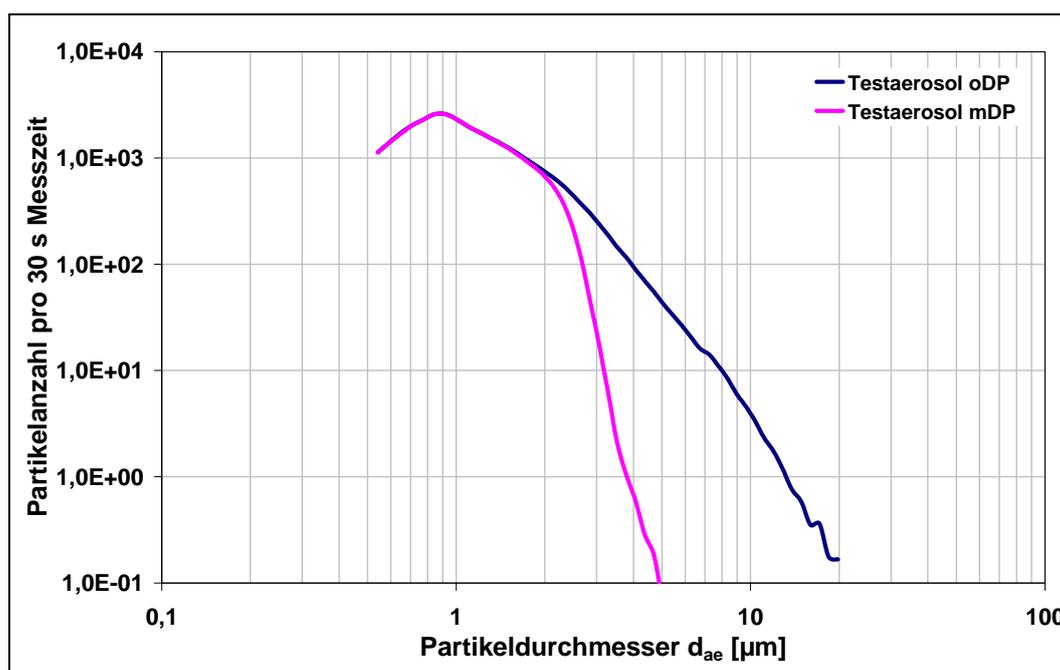


Abbildung 13: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für Prallplattenabstand 6 mm

In Abbildung 14 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 6 mm aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs 2,37-2,74 μm d_{p50} Werte von 2,479-2,487 μm .

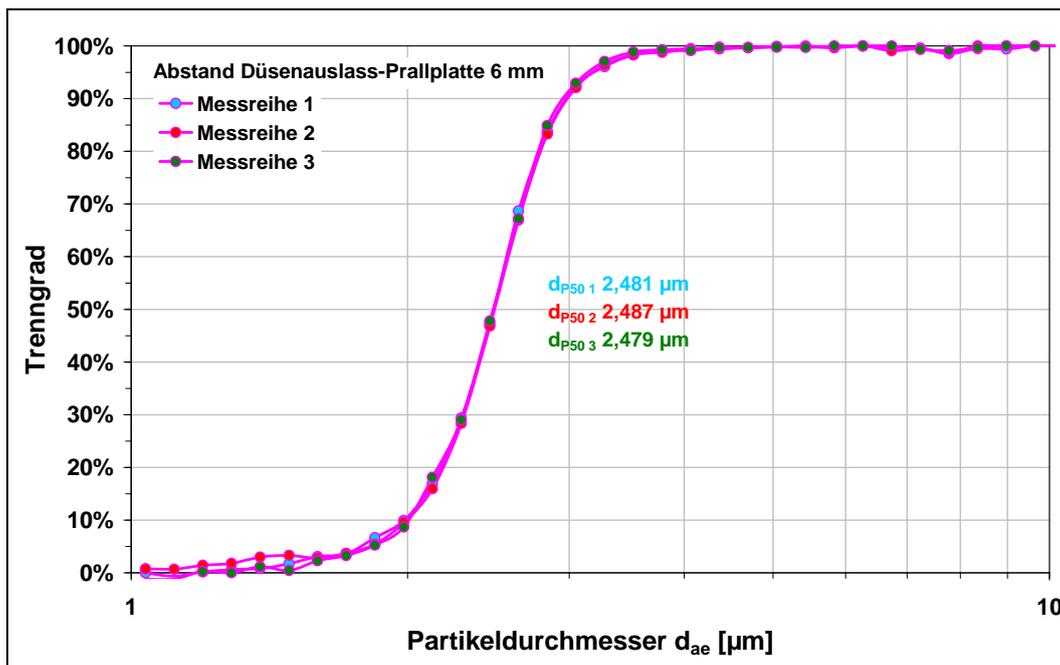


Abbildung 14: Trenngradkurven für den $PM_{2,5}$ -Impaktor mit Prallplattenabstand 6 mm der 3 Messreihen

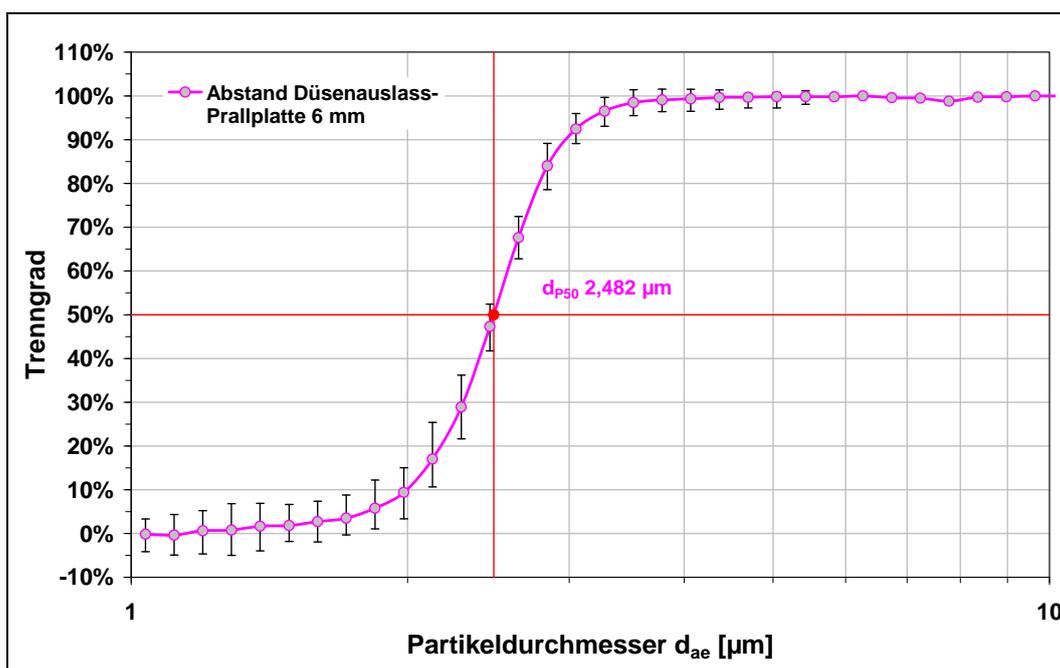


Abbildung 15: Gemittelte Trenngradkurve für den $PM_{2,5}$ Impaktor mit Prallplattenabstand 6 mm, die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Abstand Düsenauslass-Prallplatte von 6 mm ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{p50}=2,48 \mu\text{m}$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu 1,16.

	d_{p50}	Steilheit
Messreihe 1	2,481 µm	1,159
Messreihe 2	2,487 µm	1,158
Messreihe 3	2,479 µm	1,158
Gesamt	2,482 µm	1,158

Tabelle 4: Zusammenfassung des d_{p50} für den Prallplattenabstand von 10 mm

Zusammengefasst sind die Messergebnisse in Tabelle 5 eingetragen.

PM _{2,5} -Impaktor			
Abstand zur Prallplatte	6 mm	8 mm	10 mm
Cut-off d_{p50}	2,482 µm	2,532 µm	2,582 µm
Steilheit $(d_{p84}/d_{p16})^{0,5}$	1,158	1,175	1,184

Tabelle 5: Zusammenfassung der Trenngradermittlungen von 3 verschiedenen Düsenansätzen

Danach ergibt sich, dass die cut-off-Durchmesser, die mit den 3 verschiedenen Abständen Düsenauslass-Prallplatte ermittelt wurden, alle in einem Toleranzbereich von 2,5 µm ± 5 % (2,375-2,625 µm) liegen.

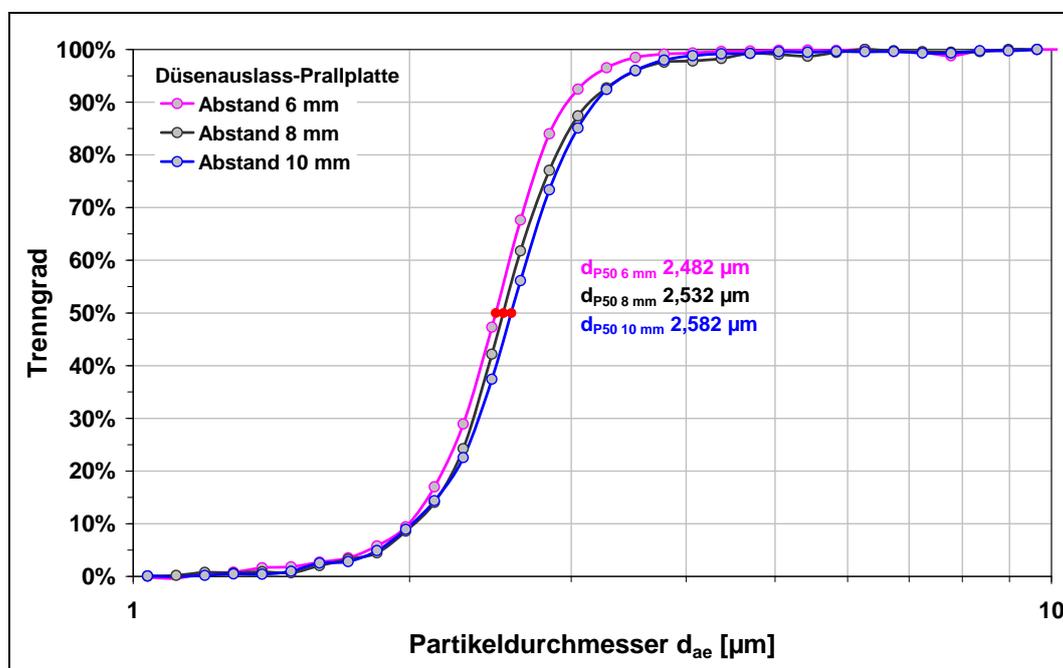


Abbildung 16: Zusammenfassung der Trenngradkurven mit verschiedenen Abständen Düsenauslass-Prallplatte

7 Modellrechnungen

Um die verschiedenen Abstände von Düsenauslass zur Prallplatte zu bewerten, werden zwei standardisierte Volumenverteilungsfunktionen der Partikelgröße herangezogen (nach [9], [10]), die international die durchschnittliche Umgebungsluft in urbanen und ländlichen Räumen darstellen sollen. Diese Verteilungsfunktionen sind bimodale Verteilungen, die mithilfe von logarithmischen Normalverteilungen für den groben und feinen Modus beschrieben werden:

$$f(d, \sigma_g, d_{50}) = \frac{1}{\ln \sigma_g \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_{20})^2}{2 \cdot (\ln \sigma_g)^2} \right]$$

$$q_3(d) = \frac{dQ_3(d)}{d \ln d} = y \cdot f(d, \sigma_{gA}, d_{50A}) + (1-y) \cdot f(d, \sigma_{gB}, d_{50B})$$

mit

Urban			Ländlich		
$q_{3u}(\bar{d}_i)$	A	B	$q_{3r}(\bar{d}_i)$	A	B
$d_{50,u}$	0,3 μm	10 μm	$d_{50,r}$	0,25 μm	11 μm
$\sigma_{g,u}$	2,2	3,1	$\sigma_{g,r}$	2,2	4
y_u	0,45		y_r	0,18	

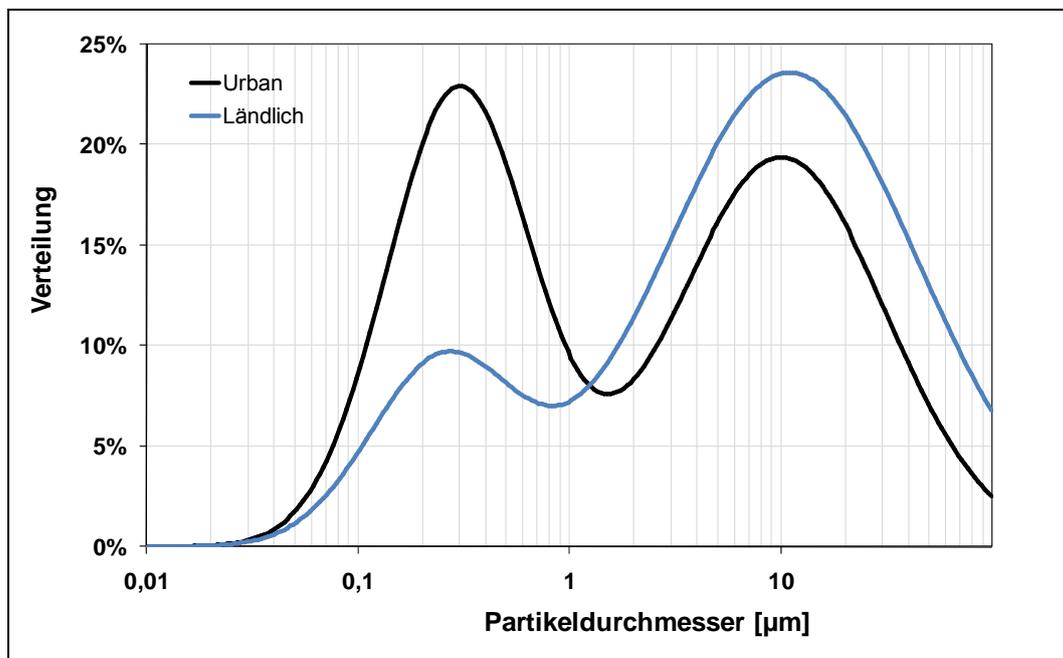


Abbildung 17: Standardisierte Volumenverteilung für den urbanen und ländlichen Bereich [9], [10]

Mit diesen Verteilungsfunktionen und einer angenommenen mittleren Dichte von $\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$ sowie einer Gesamtstaubkonzentration (TSP) von $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (im Größenbereich des APS) wurden bei den verschiedenen Abständen (Düse-Prallplatte) und den dazugehörigen Trenngradkurven, die in Tabelle 6 angegebenen $PM_{2,5}$ -Konzentrationen errechnet.

Danach ergibt sich, dass für eine Partikelgrößenverteilung, die einem urbanen Aerosol entspricht, bei Vergrößerung des Prallplattenabstands um 2 mm gegenüber dem in der Norm angegebenen mittleren Abstand von 8 mm, die $PM_{2,5}$ -Konzentration um 0,87 % ($0,143 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) über- und bei Verringerung des Abstands um 2 mm die $PM_{2,5}$ -Konzentration um 2,18 % ($0,257 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) unterschätzt wird.

Bei Betrachtung der Verteilung, die einem ländlichen Aerosol entspricht, ergeben sich Zunahmen von +1,25 % ($0,131 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) bei 10 mm bzw. Abnahmen von -3,93 % ($0,409 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) bei 6 mm Abstand von Düsenauslass zur Prallplatte.

PM_{2,5}-Impaktor			
Abstand zur Prallplatte	6 mm	8 mm	10 mm
	Urbaner Bereich		
TSP	50 $\mu\text{g/m}^3$	50 $\mu\text{g/m}^3$	50 $\mu\text{g/m}^3$
PM _{2,5}	16,018 $\mu\text{g/m}^3$	16,375 $\mu\text{g/m}^3$	16,518 $\mu\text{g/m}^3$
Abweichung absolut	-0,257 $\mu\text{g/m}^3$		+0,143 $\mu\text{g/m}^3$
Abweichung relativ	-2,18 %	-	+0,87 %
	Ländlicher Bereich		
TSP	50 $\mu\text{g/m}^3$	50 $\mu\text{g/m}^3$	50 $\mu\text{g/m}^3$
PM _{2,5}	10,007 $\mu\text{g/m}^3$	10,416 $\mu\text{g/m}^3$	10,547 $\mu\text{g/m}^3$
Abweichung absolut	-0,409 $\mu\text{g/m}^3$		+0,131 $\mu\text{g/m}^3$
Abweichung relativ	-3,93 %	-	+1,25 %

Tabelle 6: Zusammenfassung der Modellrechnungen

8 Literatur

- [1] DIN EN 12341: Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10} oder $PM_{2,5}$ -Massenkonzentration des Schwebstaubes, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Deutsche Fassung EN 12341, August 2014
- [2] VDI-2066 Blatt 1: Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, November 2006
- [3] APS Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, Instruction Manual, TSI GmbH, December 2001
- [4] Feststoffdispersierer RBG-1000, Bedienungsanleitung, Palas[®] GmbH, Karlsruhe, Februar 2002
- [5] ISO 12103-1: Road vehicles - Test contaminants for filter evaluation - Part 1: Arizona test dust, Ausgabe März 2016
- [6] Kleinfiltergerät LVS3.1/PNS3.1-15, Bedienungsanleitung, Edition 01.03d, Ingenieurbüro Norbert Derenda, Tetlow, 2003
- [7] VDI-Richtlinie 2463 Blatt 7: Messen von Partikeln, Messen der Massenkonzentration (Immission), Filterverfahren - Kleinfiltergerät GS 050, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, August 1982
- [8] VDI-Richtlinie 2463 Blatt 11: Messen von Partikeln, Messen der Massenkonzentration (Immission), Filterverfahren – Filterwechsler Digital DHA-80, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, Oktober 1996
- [9] Seinfeld J. H., Pandis S. N.: Atmospheric chemistry and physics. Wiley Interscience Publications, John Wiley & Sons, New York, USA, 2006
- [10] DIN EN ISO 16890-1: Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM) (ISO 16890-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16890-1:2016

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Kaminski', is positioned above a horizontal line.

Dipl.-Ing. Heinz Kaminski
Wiss. Mitarbeiter

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Christof Asbach', is positioned above a horizontal line.

Dr.-Ing. Christof Asbach
Abteilungsleiter
Filtration & Aerosolforschung