

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

Bereich:
Luftreinhaltung &
Nachhaltige Nanotechnologie

Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg



Heinz Kaminski, Thomas Kuhlbusch

Bericht Nr. LP 59/2010

Überprüfung der Trenngrade zweier PM₁₀-Vorabscheider für 2,3 m³/h mittels Messung mit polydispersem Aerosol

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

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

Duisburg, 22. Dezember 2010

Zusammenfassung

Das Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) beauftragt, den Einfluss der Düsenform auf die Abscheidecharakteristik von PM₁₀-Vorabscheidern für Low Volume Filtriersammler zu untersuchen. Dazu wurden vom Hessischen Landesamt 2 PM₁₀-Vorabscheider für einen Luftdurchsatz von 2,3 m³/h mit auswechselbaren Düsen zur Verfügung gestellt. Die Vorabscheidergehäuse waren baugleich, sodass eventuelle Unterschiede nur auf die Düsen zurückgeführt werden konnten. Untersucht wurde anhand drei verschiedener Düsensätze (1 x lange Düsen, 2 x kurze Düsen) die Trenngradbeeinflussung der Abscheider, die durch unterschiedliche Düsenlängen sowie bei den beiden kurzen Düsensätzen durch den Abstand der Düsen zur Prallplatte hervorgerufen werden. Die Unterscheidung zwischen „lang“ und „kurz“ bezieht sich hier auf die Länge über den Innendurchmesser der Düse dem genormten Maß von 6,5 mm entspricht.

Dazu wurde im Labor ein Versuchsstand aufgebaut, der aus dem PM₁₀-Vorabscheider, der isokinetischen Probenahmesonde, dem Partikelzähler, einem Partikelgenerator zur definierten Staubbelastung und einem Low Volume Filtriersammler zur Einstellung des benötigten Volumenstroms bestand. Als Teststaub wurde naturreines Calciumcarbonat verwendet.

Zur Bewertung der Abscheidecharakteristik der PM₁₀-Vorabscheider wurde jeder Düsensatz 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 3 verschiedenen Düsensätzen ermittelt wurden, alle in einem Toleranzbereich von 10 µm ± 5 % (9,5-10,5 µm) liegen:

Düsensatz	1	2	3
	Lange Düsen	Kurze Düsen	Kurze Düsen
Düsendurchmesser	Ø 6,5 mm	Ø 10 und 6,5 mm	Ø 10 und 6,5 mm
Abstand zur Prallplatte	10,7 mm	8,0 mm	9,7 mm
Cut-off d_{p50}	9,73 µm	10,16 µm	10,28 µm
Steilheit $(d_{p84}/d_{p16})^{0,5}$	1,38	1,27	1,28

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 den langen Düsen etwas flacher verläuft als mit den kurzen Düsen (siehe Zeile Steilheit in der Tabelle). Für Partikel $d_{ae} > 10 \mu\text{m}$ ergeben sich dadurch niedrigere Trenngradwerte für die langen Düsen, was auch die Massenkonzentrationsbestimmung beeinflusst.

Beim Vergleich der Trenngradkurven für kurze Düsen mit unterschiedlichen Prallplattenabständen kann beim größeren Prallplattenabstand ein nur sehr leicht höherer cut-off und eine minimal flachere Trenngradkurve erkannt werden. Die Unterschiede bei Vergrößerung des Prallplattenabstands um 1,7 mm (8,0 mm auf 9,7 mm) sind allerdings so gering, dass sie als nicht signifikant anzusehen sind.

Zur Abschätzung der möglichen Auswirkungen der Trenngradabweichungen der drei Düsensätze untereinander, wurden Modellrechnungen mit zwei Modellstäuben mit unterschiedlichen Anzahl- und Massengrößenverteilungen zur Bestimmung der Massenkonzentration bei einer Probenahme durchgeführt.

Die Berechnungen ergaben, dass bei extrem „grobem“ Stäuben (sehr hoher Anteil der Masse im Partikeldurchmesserbereich 5-20 μm) die mit den langen Düsen bestimmte Massenkonzentration gegenüber den kurzen Düsen um 6,6 % bzw. 4,6 % (Düzensatz 2 bzw. 3) höher liegt.

Bei der Berechnung mit einem außenluftähnlichen Aerosol mit aufgegebenen 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lag die mit den langen Düsen bestimmte Konzentration gegenüber den „kurzen Düsen 2“ um nur 0,3 % höher und gegenüber der Variante mit etwas größerem Prallplattenabstand (kurze Düsen 3) um 1,4 % niedriger.

Summary

The Institute of Energy and Environmental Technology (IUTA) was commissioned by the Hessian Agency for Environment and Geology (HLUG) to investigate the separation characteristics of PM₁₀-sampling heads using two different types of nozzles. Two sets of PM₁₀-sampling heads were made available. The PM₁₀-sampling heads were designed for flow rates of 2.3 m³/h and were equipped with exchangeable nozzles. Both sampling heads were identical in construction and thus any differences in the measurement results can be attributed to the nozzle design. Three different sets of nozzles (1 x long nozzles, 2 x short nozzles) were investigated. The design differences were a) length of the nozzle determining inner diameter of 6.5 mm at the outlet and b) in the case of the short nozzles, the difference in total length of the nozzle, which also determines the distance between the nozzle outlet and the impactor plate. The test-rig in the laboratory consisted of the PM₁₀-sampling head, an isokinetic sampling probe, a particle sizer, a particle generator to provide a well-defined aerosol and a low-volume-sampler to control the required flow rate. Pulverised calcium carbonate (CaCO₃) was used as test aerosol.

Applying a defined measurement scheme, the performance of each set of nozzles was measured in three different test series to evaluate the separation characteristics of the PM₁₀-sampling head. For each test series 30 separation efficiency curves were determined with each efficiency curve consisting of 52³ individual separation efficiencies according to the number of size fractions distinguished by the particle sizer. 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 different sets of nozzles agree within in tolerance range of 10 µm ± 5 % (9.5-10.5 µm).

Nozzle set	1	2	3
	Long nozzles	Short nozzles	Short nozzles
Nozzle diameter	Ø 6.5 mm	Ø 10 and 6.5 mm	Ø 10 and 6.5 mm
Impactor plate distance	10.7 mm	8.0 mm	9.7 mm
Cut-off d_{p50}	9.73 µm	10.16 µm	10.28 µm
Slope (d_{p84}/d_{p16})^{0,5}	1.38	1.27	1.28

The separation efficiency curve determined with the long nozzles is less steep than the curves with short nozzles (refer to the table above). This results in lower separa-

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

tion efficiency values for particles $d_{ae} > 10 \mu m$ and also affects the mass concentration determination.

The comparison of the separation efficiency curves of the two sets of short nozzles shows only a small but not significant higher cut-off diameter for the nozzles with an increased impactor plate distance. The slope is marginal steeper. Hence, no significant difference in the separation efficiencies due to a change of 1.7 mm distance between impactor plate and the outlet of the nozzle were determined.

Model calculations with two artificial aerosol supplies, very different in mass concentration and particle number size- and -mass distribution, were carried out to evaluate the possible effects of the separation efficiency deviations.

The calculations with an extreme high fraction of coarse particles showed that the mass concentration calculated with the long nozzles (nozzle set 1) is 6.6 % and 4.6 % higher compared to those derived with the short nozzle set 2 and 3 respectively. The coarse model aerosol has a very high mass fraction in the particle size range 5-20 μm .

Applying an artificial aerosol particle distribution similar to ambient air and with a concentration of about $56 \mu g/m^3$, the calculations showed that the mass concentration measured by using the long nozzles is only 0.3 % higher compared to the short nozzle set 2 and 1.4 % lower compared to the short nozzle set 3, which is the set with the increased impactor plate distance.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Summary	4
1 Einleitung	7
2 PM₁₀-Vorabscheider	7
3 Versuchsvorbereitungen	10
3.1 Isokinetische Probenahme	10
3.2 Übergang Vorabscheider - Filtriersammler	12
4 Messgeräte und Qualitätssicherung	12
4.1 Partikelmessgerät	12
4.2 Partikelgenerator	12
4.3 Partikelmaterial	12
4.4 Filtriersammler	13
4.5 Qualitätssicherung	13
4.5.1 Kalibrierung Partikelmessgerät	13
4.5.2 Überprüfung Volumenstrom	14
4.5.3 Reinigung	14
5 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung	14
5.1 Auswertung	16
6 Ergebnisse	17
6.1 Düsensatz 1 (durchgehend Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 10,7 mm)	17
6.2 Düsensatz 2 (Ø 10 mm verjüngt auf Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm)	19
6.3 Düsensatz 3 (Ø 10 mm verjüngt auf Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 9,7 mm)	21
7 Modellrechnungen	24
8 Literatur	27

1 Einleitung

Das Institut für Energie- und Umwelttechnik wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie beauftragt, den Einfluss der Düsenform auf die Abscheidecharakteristik von PM₁₀-Vorabscheidern für Low Volume Filtriersammler zu untersuchen. Dafür wurden vom Hessischen Landesamt zwei PM₁₀-Vorabscheider (komplett) und ein extra Düsensatz zur Verfügung gestellt. Die Vorabscheider sind bauseitig derart gefertigt, dass ein Austausch der Düsen aufgrund von Steckverbindungen leicht möglich ist.

Im Fokus der Untersuchungen standen die Trenngradbeeinflussungen der Abscheider, welche durch unterschiedliche Düsenlängen sowie durch den Abstand Düsen zur Prallplatte hervorgerufen werden. Dazu wurden 2 Düsensätze mit unterschiedlich langen Düsen sowie ein weiterer Düsensatz mit kurzen Düsen untersucht. Die Unterscheidung zwischen „lang“ und „kurz“ bezieht sich hier auf die Länge über den Innendurchmesser der Düse dem genormten Maß von 6,5 mm entspricht. Die Vorabscheider wurden für einen Luftdurchsatz von 2,3 m³/h konzipiert und sollten mit atmosphärischem Aerosol überprüft werden. Dazu wurde ein Teststand bestehend aus Vorabscheider, Filtriersammler, Aerosolstromentnahme und einem Instrument zur Bestimmung von Partikelanzahlgrößenverteilungen aufgebaut und Messungen mit polydisperssem Aerosol (Außenluft) durchgeführt.

Die mit dem aufgebauten Teststand durchgeführten Messungen an der Außenluft führten zu nicht sinnvoll verwertbaren Daten, da die Partikelanzahlen im relevanten Partikelgrößenbereich ($d_{ae} \geq 5-15 \mu\text{m}$) extrem niedrig lagen und zusätzlich großen Schwankungen unterlagen. Aus diesem Grund wurde ein Versuchsstand im Labor aufgebaut, an dem die Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Mit einer definierten Partikelgenerierung wurde eine Staubbelastung der Luft simuliert und die Bestimmung der PM₁₀-Vorabscheidertrenngrade durchgeführt.

2 PM₁₀-Vorabscheider

Vom Hessischen Landesamt wurden 2 Vorabscheider und zusätzlich ein weiterer Düsensatz geliefert. Beide Vorabscheider sind für einen cut-off² von 10 μm aerodynamischen Durchmessers (PM₁₀) bei 2,3 m³/h mit jeweils 8 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 leicht möglich.

Ein Vorabscheider war mit Düsenrohren des Innendurchmessers von 6,5 mm bestückt (6,5 mm über der gesamten Rohrlänge nach Düseneinlauf („lange Düse“), entsprechend der DIN EN 12341, siehe Abbildung 1). Diese eingesteckten Düsenrohre weisen eine Länge von 63,0 mm auf und ergeben mit der abgesetzten Prallplatte einen Abstand zwischen Düsenausgang und Prallplatte von 10,7 mm.

Der zweite Vorabscheider war mit Düsenrohren vom Innendurchmesser von 10 mm bestückt, bei denen kurze Düsen mit dem Innendurchmesser von 6,5 mm am unteren Ende eingesetzt wurden („kurze Düse“). Diese Fertigungsart entspricht der DIN EN 14907 [2] und ist für PM_{2,5}-Vorabscheider vorgesehen, dort aber mit Düsendurchmesser von 2,6 mm, siehe dazu Abbildung 2. Außerdem weisen die eingesteckten Düsenrohre eine Länge von 65,7 mm auf (DIN EN 12341 gibt 63 mm vor), somit ergibt sich mit der abgesetzten Prallplatte ein Abstand zwischen Düsenausgang und Prallplatte von 8,0 mm.

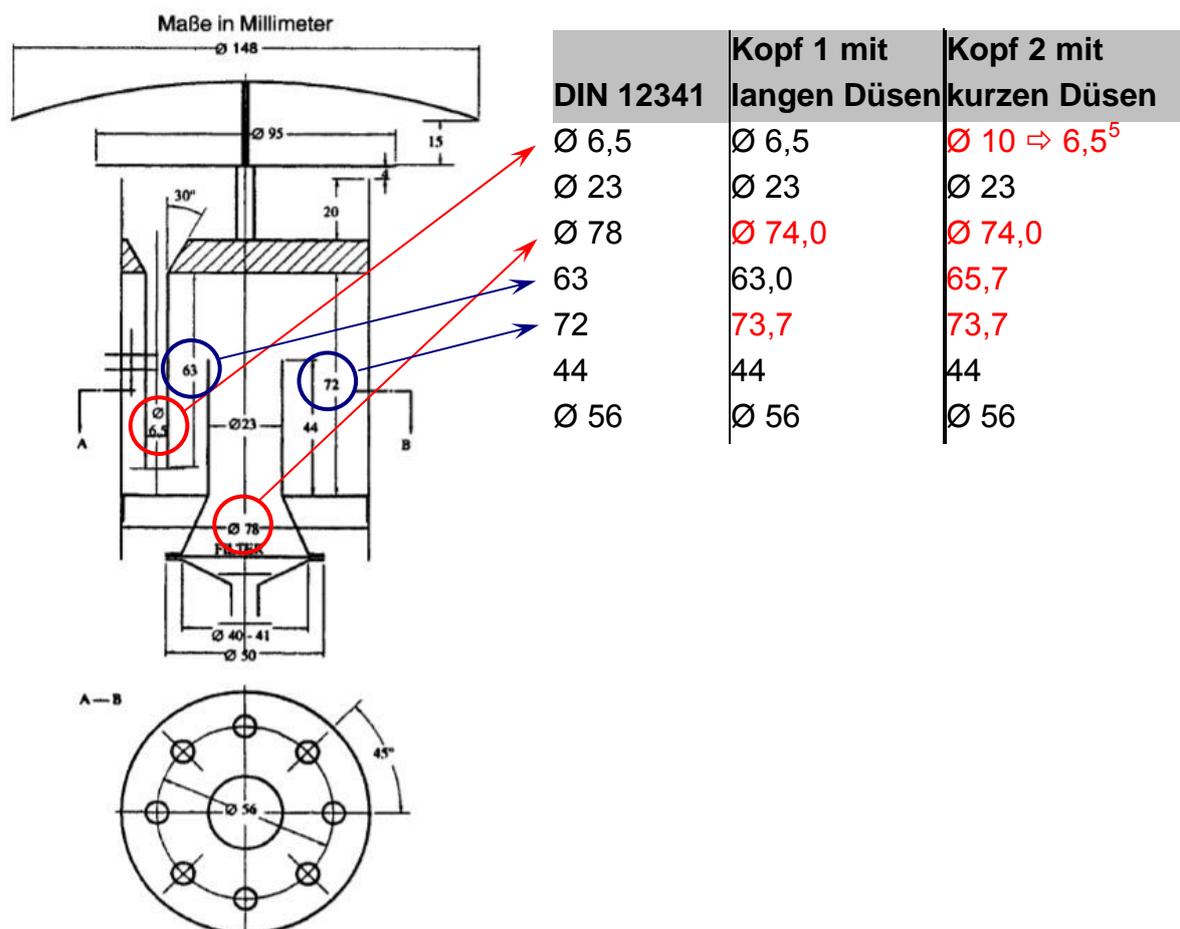


Abbildung 1: Konstruktionsmerkmale für einen PM₁₀-Vorabscheider (LVS) nach DIN EN 12341 [1]

Bei beiden gelieferten Vorabscheidern beträgt der Innendurchmesser des Gehäuses 74 mm. Die DIN EN 12341 gibt einen Innendurchmesser von 78 mm vor.

Der zusätzlich gelieferte Düsenatz entspricht dem Düsenatz mit den eingesetzten kurzen Düsen, nur dass sich im eingebauten Zustand eine Länge von 64,0 mm und somit eine Abstand Düse-Prallplatte von 9,7 mm ergibt.

⁵ Ø 10 mm, erst gegen Ende auf 6,5 mm verjüngt (prinzipiell ähnlich zu Abbildung 2)

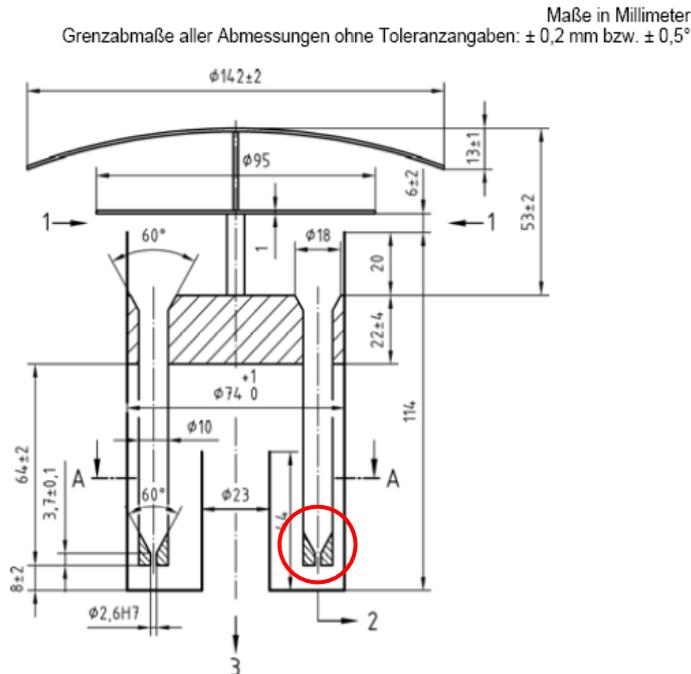


Abbildung 2: Konstruktionsmerkmale für einen PM_{2,5}-Vorabscheider (LVS) nach DIN EN 14907 [2]

Damit standen für die Trenngraduntersuchungen der PM₁₀-Vorabscheider folgende Düsensätze zur Verfügung:

Düzensatz	1	2	3
	Lange Düsen DIN 12341	Kurze Düsen	Kurze Düsen
Düsendurchmesser	Ø 6,5 mm	Ø 10 ⇒ 6,5 mm	Ø 10 ⇒ 6,5 mm
Gesamtlänge	77,5 mm	80,1 mm	78,5 mm
Länge eingebaut	63,0 mm	65,7 mm	64,0 mm
Abstand zur Prallplatte	10,7 mm	8,0 mm	9,7 mm

Tabelle 1: Untersuchte Düsensätze

Beide PM₁₀-Vorabscheider weisen mit den eingebauten Düsenrohren Unterschiede zu den in Anhang B1, Abbildung 1 der DIN EN 12341 dargestellten Konstruktionsmerkmalen auf.

Allerdings sind in der DIN EN 12341 keinerlei Toleranzangaben für eine Fertigung der Vorabscheider vorgesehen, sodass für diesen Fall evtl. die Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 [4] Gültigkeit haben.

Die DIN EN 14907 gibt hingegen Toleranzen für die eingebaute Düsenrohrlänge mit ± 2 mm (somit 62-66 mm) sowie einen Prallplattenabstand ebenso mit ± 2 mm (somit 6-10 mm) an, siehe Abbildung 2.

Ohne Zulassung allgemeiner Toleranzen nach DIN ISO 2768-1 oder die Übertragung der Toleranzen gemäß DIN EN 14907, ist die Einhaltung von exakt angegebenen Maßen für die Konstruktion eines Vorabscheiders nach DIN EN 12341 in der praktischen Fertigung freilich fraglich. In jedem Fall entspricht die „kurze“ Düsenform jedoch nicht den Vorgaben der Norm und ist daher insbesondere Gegenstand dieser Untersuchung.

3 Versuchsvorbereitungen

Um den Versuchsstand aufbauen zu können, wurden vorab zwei Anpassungen durchgeführt:

- Sicherstellung einer isokinetischen Teilstromentnahme
- Übergang vom PM_{10} -Vorabscheider zum Partikelmessgerät und Filtriersammler

3.1 Isokinetische Probenahme

Zur Bestimmung der Abscheidecharakteristik der Vorabscheider musste ein Teilvolumenstrom hinter dem Vorabscheider 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 einer bestimmten Masse durch Trägheitseffekte den Strömungslinien des Teilsstroms 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 einer bestimmten Masse 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 Vorabscheiders und des Partikelmessgeräts sowie der Innendurchmesser des Luftströmungskanals zwischen Vorabscheider und Partikelmessgerät/Filtriersammler. Der erforderliche Sondeninnendurchmesser ergibt sich mit den verwendeten Auslegungsdaten aus Tabelle 2 zu 9,4 mm. Die Anfertigung der Entnahmesonde erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [3].

Luftströmungsrohr Vorabscheider-Partikelmessgerät		
Rohrdurchmesser _{r_{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 _{r_{innen}}	9,4 mm	

Tabelle 2: Auslegungsdaten für die Teilstromentnahme

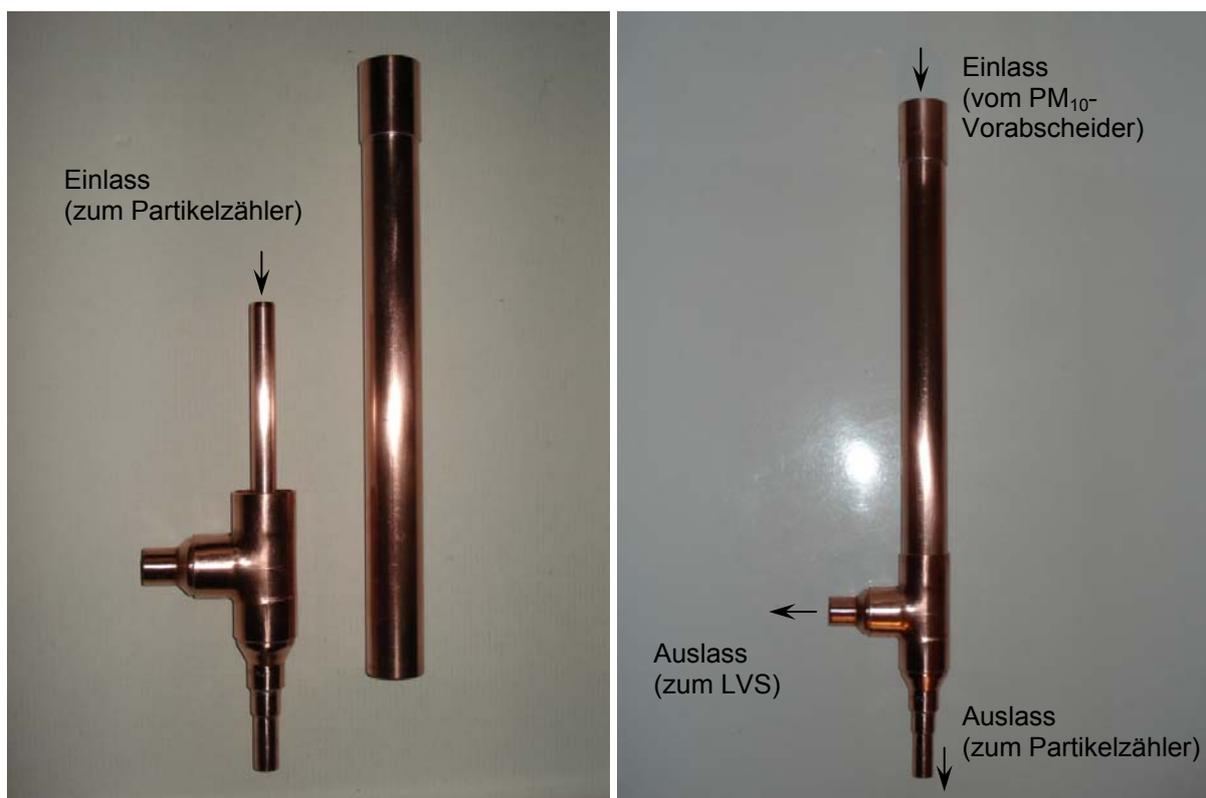


Abbildung 3: Fotos des angefertigten Luftströmungsrohrs mit isokinetischer Probenahmesonde (links: demontiert, rechts: komplett verlötet)

3.2 Übergang Vorabscheider - Filtriersammler

Der gelieferte PM₁₀-Vorabscheider 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 die Vorabscheider auf diesen Luftströmungskanal aufgesteckt werden konnten und mittels O-Ring abgedichtet wurden.

4 Messgeräte und Qualitätssicherung

4.1 Partikelmessgerät

Als Partikelmessgerät wurde ein Instrument zur Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung, der Partikelzähler 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 [6] 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 [7].

4.3 Partikelmaterial

Für die Trenngradüberprüfung wurde als Teststaub Eskal der Firma KSL Staubtechnik, Launing, verwendet. Eskal besteht aus naturreinem Calciumcarbonat mit einer Dichte von 2,7 g/cm³ und bietet neben der guten Handhabbarkeit den Vorteil eines nichttoxischen Materials. Zur Erhöhung der Staubbelastung wurden 3 verschiedene Partikelgrößen zu gleichen Volumenanteilen vermischt und dispergiert. Diese waren

Eskal 500 (mittlere Partikelgröße 5 µm), Eskal 10 (mittlere Partikelgröße 10 µm) und Eskal 20 (mittlere Partikelgröße 20 µm) [8].

4.4 Filtriersammler

Der für den PM₁₀-Vorabscheider benötigte Luftvolumenstrom von 2,3 m³/h wurde mithilfe des Low-Volume-Sammlers LVS 3, Derenda [9] erzeugt. Dieser Filtriersammler ist in den VDI-Richtlinien 2463 Blatt 7 [10] und Blatt 11 [11] 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 0,3 m³/h (5 l/min) vom Partikelmessgerät erzeugt wurden.

4.5 Qualitätssicherung

4.5.1 Kalibrierung Partikelmessgerät

Die letzte Kalibrierung des APS 3321 erfolgte am 16.03.2010. Trotzdem wurde vor Beginn des Messprogramms die Kalibrierung mithilfe von Polystyrene-Kalibrierpartikeln (PSL) und der angesaugte Volumenstrom mithilfe eines Bubble Flowmeter (Gilibrator 2, Sensodyne) überprüft. Die Überprüfung erfolgte mit PSL-Partikeln der Partikelgröße 3,04 µm (geometrischer Partikeldurchmesser). Mit einer Partikeldichte der Polystyrenepartikel von 1,049 g/cm³ ergibt sich rein rechnerisch ein aerodynamischer Partikeldurchmesser von 3,114 µm. Die Kalibrierpartikel wurden vom APS im entsprechenden Größenintervall von 2,94-3,16 µm mit dem mittleren Durchmesser von 3,05 µm eingeordnet (siehe Abbildung 4, links). Eine tiefer gehende Analyse der Messdaten ergab die Einordnung in APS-Bin-Number 264 (3,112 µm; siehe Abbildung 4, rechts) und damit eine Bestätigung der Kalibriereinstellungen.

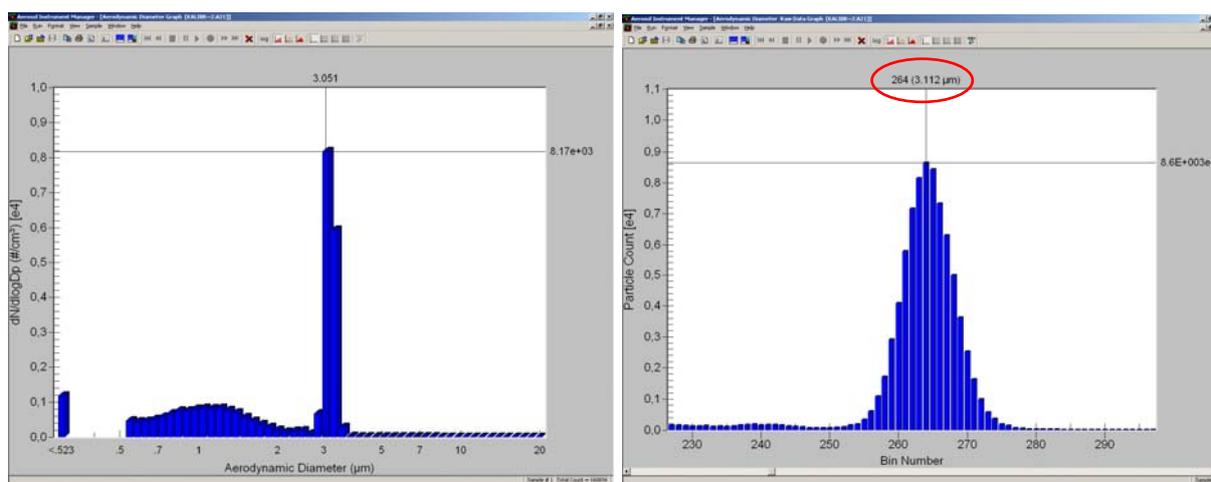


Abbildung 4: Kalibrierüberprüfung des APS 3321

4.5.2 Überprüfung Volumenstrom

Vor jeder Messreihe wurden die Volumenströme mittels Bubble Flowmeter (Gilibrator 2, Sensodyne) und Thermal Mass Flowmeter (TSI Model 3063) überprüft und ggf. nachjustiert.

4.5.3 Reinigung

Nach jeder Messreihe wurden die PM₁₀-Vorabscheider 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 der PM₁₀-Vorabscheider wurde im Labor des IUTA ein Versuchsstand aufgebaut (siehe Abbildung 5). Dieser Versuchsaufbau bestand aus dem PM₁₀-Vorabscheider, dem Strömungsrohr zum Partikelzähler mit isokinetischer Probenahmesonde, dem Partikelzähler mit Auswerteeinheit (PC), einem Partikelgenerator zur definierten Staubbelastung und einem Low-Volume-Filtriersammler zur Einstellung des benötigten Volumenstroms. Die Aufgabe des Teststaubs erfolgte in 50 cm Abstand vom PM₁₀-Vorabscheider.

Zur Bewertung der Abscheidecharakteristik der PM₁₀-Vorabscheider wurde ein Größenfraktionsspezifischer Referenzwert ermittelt, der die natürliche, geometrische, d. h. strömungsmechanisch aufgeprägte Abscheidecharakteristik des Vorabscheiders ohne Prallplatte und ohne Düsen widerspiegelt. Zunächst wurde daher die Gesamtpartikelanzahl der Laborluft mit einem modifizierten PM₁₀-Vorabscheider ohne Prallplatte gemessen, aus dem zuvor die Düsen entfernt wurden. Anschließend erfolgte die Messung mit dem zu überprüfenden PM₁₀-Vorabscheider mit eingesteckten Düsen und Prallplatte.

Eine Messreihe wurde wie folgt aufgenommen:

1. Einstellen bzw. Überprüfen des Volumenstroms.
2. Start der Staubdispergierung, anschließend Wartezeit 10 min.
3. Insgesamt 61 alternierende Messungen mit einer Messzeit von jeweils 90 s:
 - (a) mit PM₁₀-Vorabscheider **ohne Düsen und Prallplatte** (Testaerosol oDP), anschließend Wechsel des PM₁₀-Vorabscheiders und
 - (b) mit PM₁₀-Vorabscheider **mit Düsen und Prallplatte** (Testaerosol mDP), anschließend Wechsel des PM₁₀-Vorabscheiders.

Diese alternierenden Messungen wurden 30-mal wiederholt und am Ende immer durch eine Messung mit dem PM₁₀-Vorabscheider ohne Düsen und Prallplatte beschlossen. Jede Messreihe bestand damit aus 61 einzelnen Messungen. Dies ergab 61 Partikelgrößenverteilungskurven mit jeweils 52 Partikelgrößenklassen (entsprechend den Größenkanälen des Partikelmessgeräts) im Größenbereich von 0,5-20 µm. Für jeden Düsensatz wurden jeweils 3 Messreihen durchgeführt.

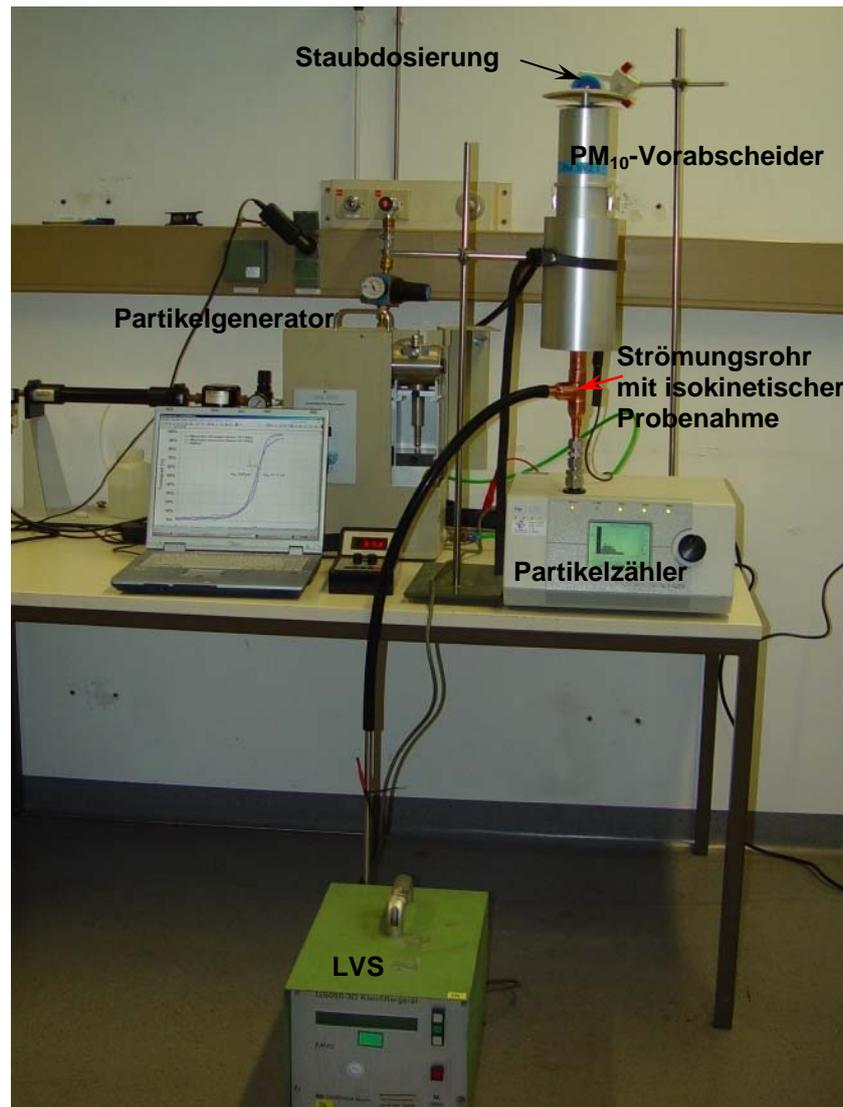


Abbildung 5: Versuchsstandanordnung im Labor

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 3 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 jeweiligen 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 Düsensatz 1 (durchgehend $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $10,7 \text{ mm}$)

In Abbildung 6 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem Vorabscheider ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem Vorabscheider mit Düsen des Düsensatzes 1 und Prallplatte (Testaerosol mDP) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen des Düsensatzes gebildet worden.

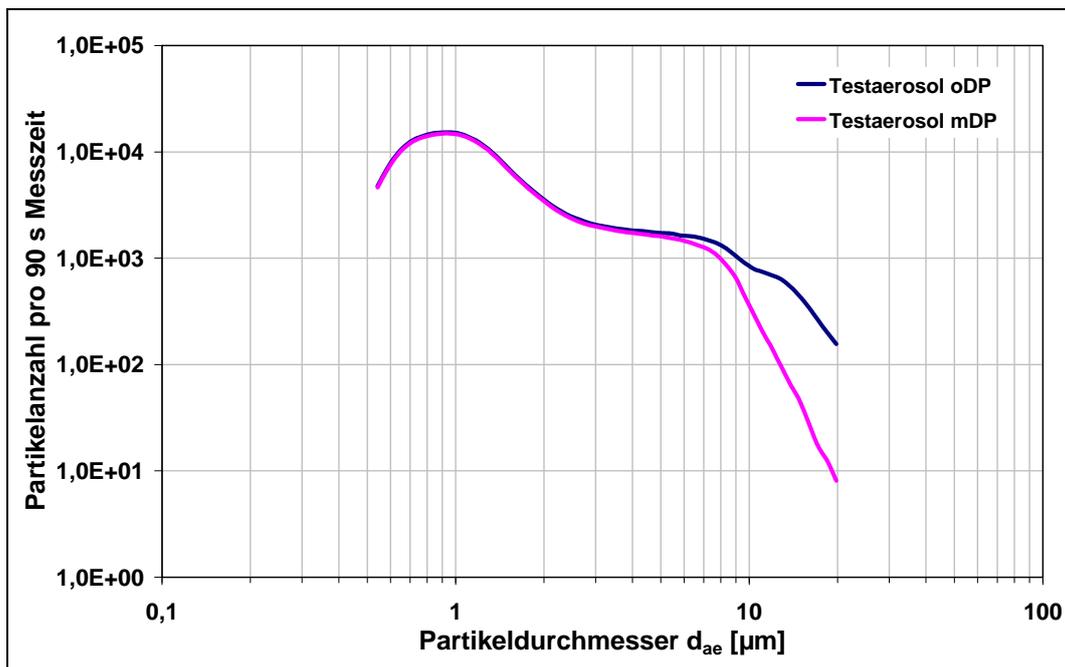


Abbildung 6: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für den Düsensatz 1 (durchgehend $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $10,7 \text{ mm}$)

In Abbildung 7 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den Düsensatz 1 (siehe Tabelle 1) aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs $8,66\text{-}11,58 \mu\text{m}$ (4 Messpunkte) d_{p50} Werte von $9,71\text{-}9,75 \mu\text{m}$ mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2=0,990\text{-}0,999$.

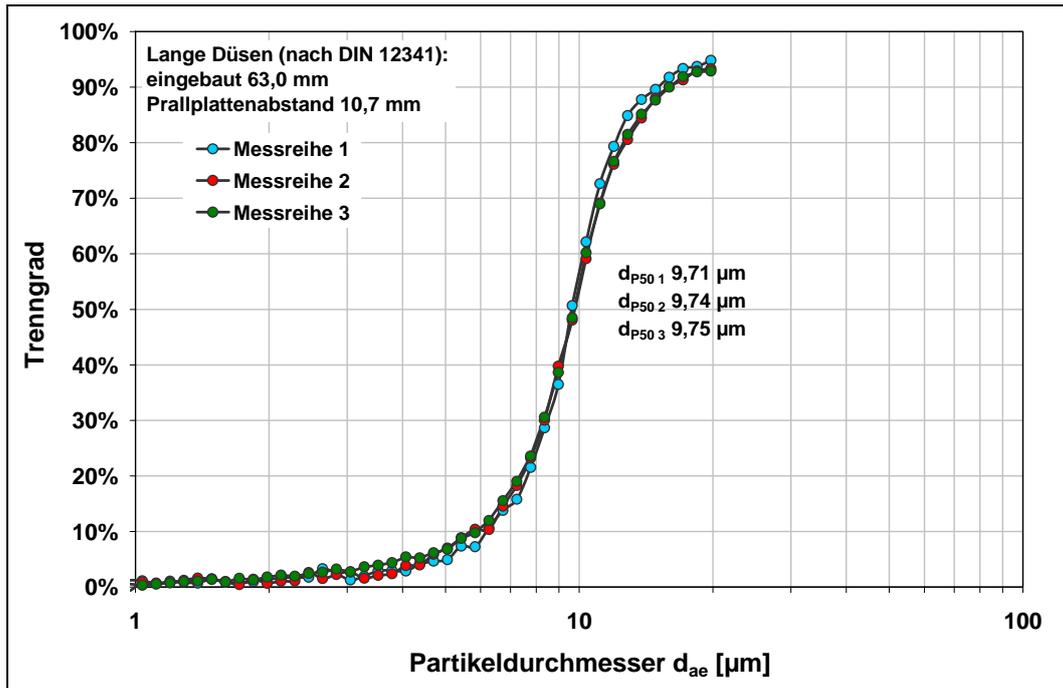


Abbildung 7: Trenngradkurven für den Düsenatz 1 (durchgehend $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $10,7 \text{ mm}$) der 3 Messreihen (Anmerkung: Dargestellt ist der Partikelgrößenbereich erst ab $1 \text{ }\mu\text{m}$ und somit jeweils nur 42 Fraktionstrenngrade (Punkte) der einzelnen Trenngradkurven, dies gilt auch für nachfolgende Trenngradkurvendiagramme.)

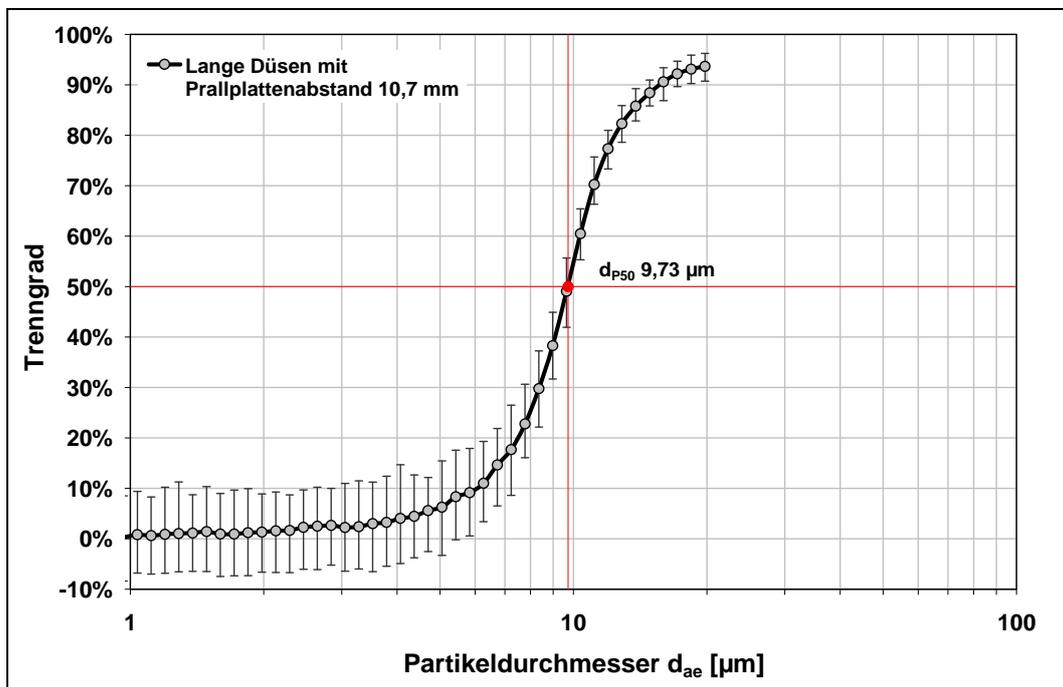


Abbildung 8: Gemittelte Trenngradkurve für den Düsenatz 1 (durchgehend $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $10,7 \text{ mm}$), die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Düsenatz 1 ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{p50}=9,73 \text{ }\mu\text{m}$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu $1,38$.

	d _{p50}	R ²	Steilheit
Messreihe 1	9,71 µm	0,990	1,32
Messreihe 2	9,74 µm	0,999	1,41
Messreihe 3	9,75 µm	0,995	1,41
Gesamt	9,73 µm	0,997	1,38

Tabelle 3: Ermittlung des d_{p50} für den Düsensatz 1 (durchgehend Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 10,7 mm) durch lineare Regression der Trenngradkurven im Partikelgrößenbereich von 8,66-11,58 µm

6.2 Düsensatz 2 (Ø 10 mm verjüngt auf Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm)

In Abbildung 9 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem Vorabscheider ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem Vorabscheider mit Düsen des Düsensatzes 2 und Prallplatte (Testaerosol mDP) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen des Düsensatzes gebildet worden.

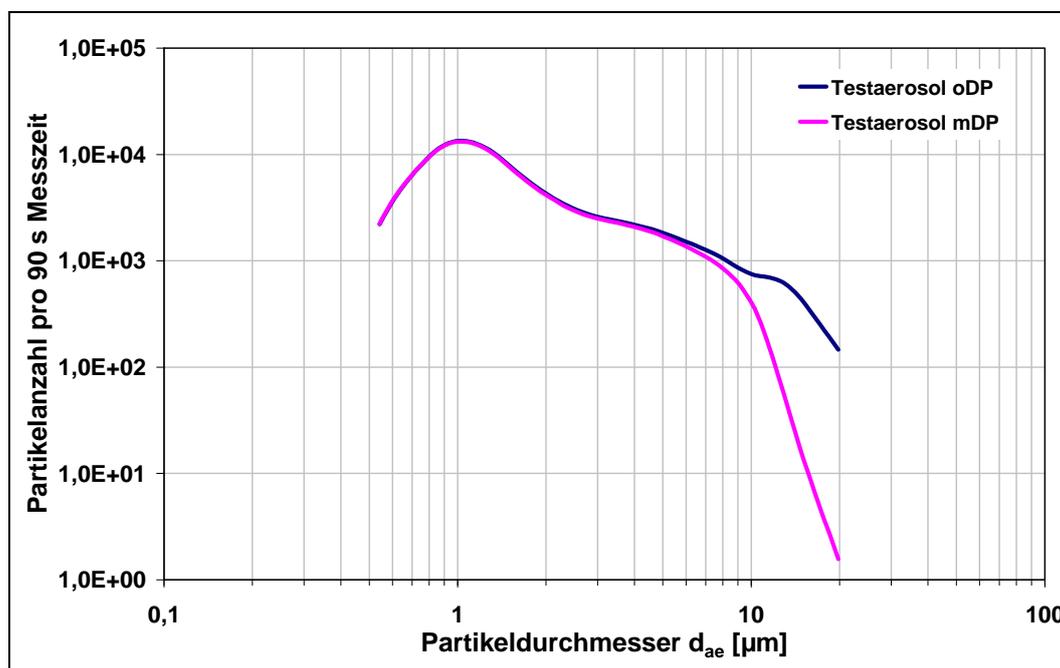


Abbildung 9: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für den Düsensatz 2 (Ø 10 mm verjüngt auf Ø 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm)

In Abbildung 10 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den Düsenatz 2 aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs 9,31-11,58 μm (3 Messpunkte) d_{p50} Werte von 10,12-10,19 μm mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2=0,994-0,998$.

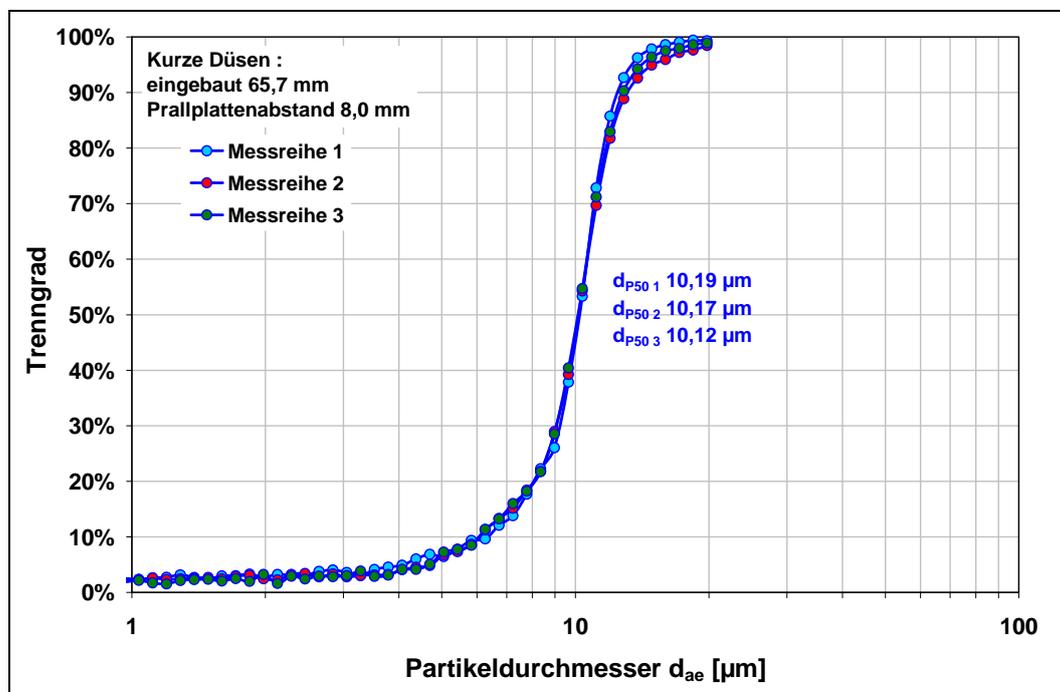


Abbildung 10: Trenngradkurven für den Düsenatz 2 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm) der 3 Messreihen

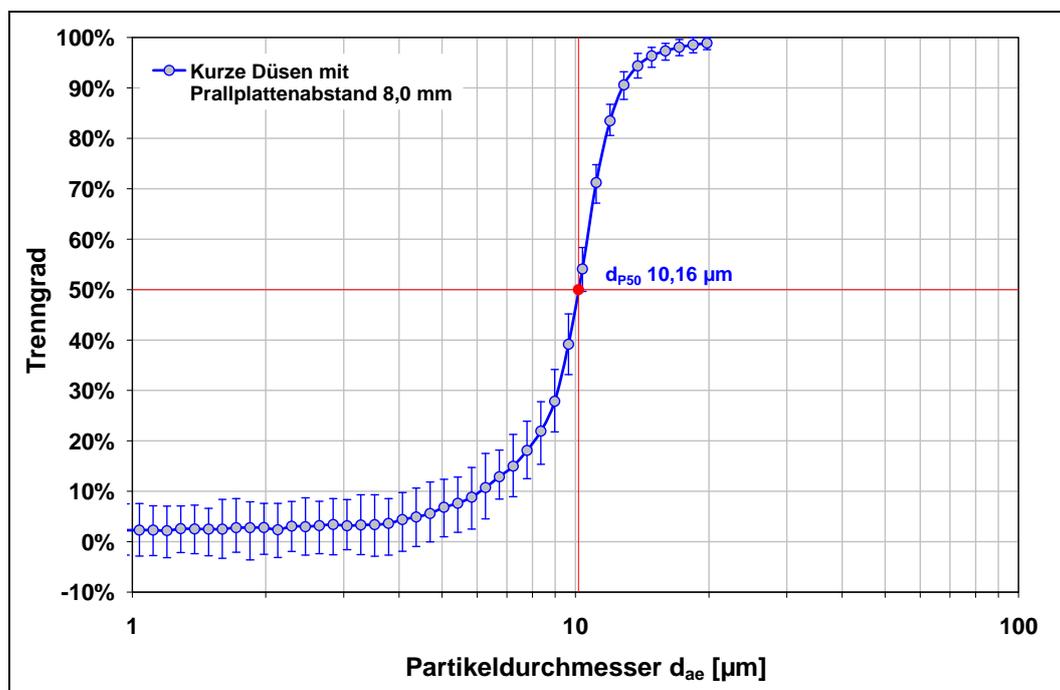


Abbildung 11: Gemittelte Trenngradkurve für den Düsenatz 2 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm), die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Düsenatz 2 ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{p50}=10,16 \mu\text{m}$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu 1,27.

	d_{p50}	R^2	Steilheit
Messreihe 1	10,19 μm	0,998	1,25
Messreihe 2	10,17 μm	1,000	1,29
Messreihe 3	10,12 μm	0,999	1,29
Gesamt	10,16 μm	0,999	1,27

Tabelle 4: Ermittlung des d_{p50} für den Düsenatz 1 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 8,0 mm) durch lineare Regression der Trenngradkurven im Partikelgrößenbereich von 9,31-11,58 μm

6.3 Düsenatz 3 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 9,7 mm)

In Abbildung 12 sind die gemittelten Partikelgrößenverteilungen der Messungen mit dem Vorabscheider ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und der Messungen mit dem Vorabscheider mit Düsen des Düsenatzes 3 und Prallplatte (Testaerosol mDP) dargestellt. Diese sind zur Veranschaulichung als Mittel aus den Messungen der 3 Messreihen des Düsenatzes gebildet worden.

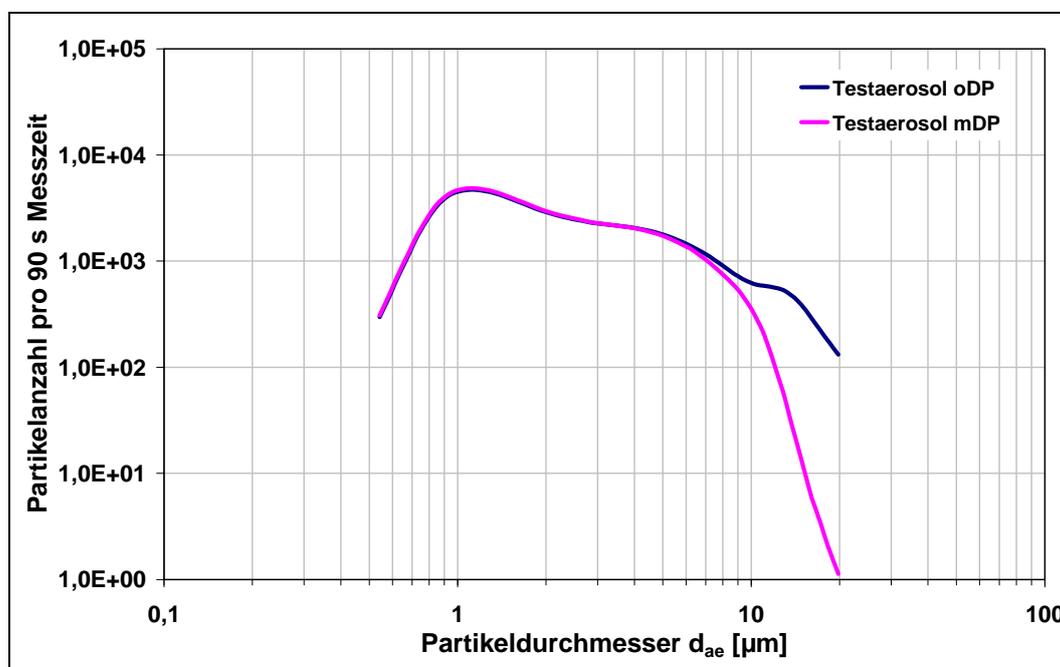


Abbildung 12: Gemittelte Partikelgrößenverteilungen der Messungen ohne Düsen und Prallplatte (Testaerosol oDP) und mit Düsen und Prallplatte (Testaerosol mDP) für den Düsenatz 3 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 9,7 mm)

In Abbildung 13 sind die Trenngradkurven der Einzelmessungen der 3 Messreihen für den Düsenatz 3 aufgezeigt. Aus den Messreihen errechnen sich durch lineare Regression innerhalb des Partikelgrößenbereichs $9,31\text{-}11,58 \text{ }\mu\text{m}$ (3 Messpunkte) d_{p50} Werte von $10,21\text{-}10,32 \text{ }\mu\text{m}$ mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2=0,999\text{-}1,000$.

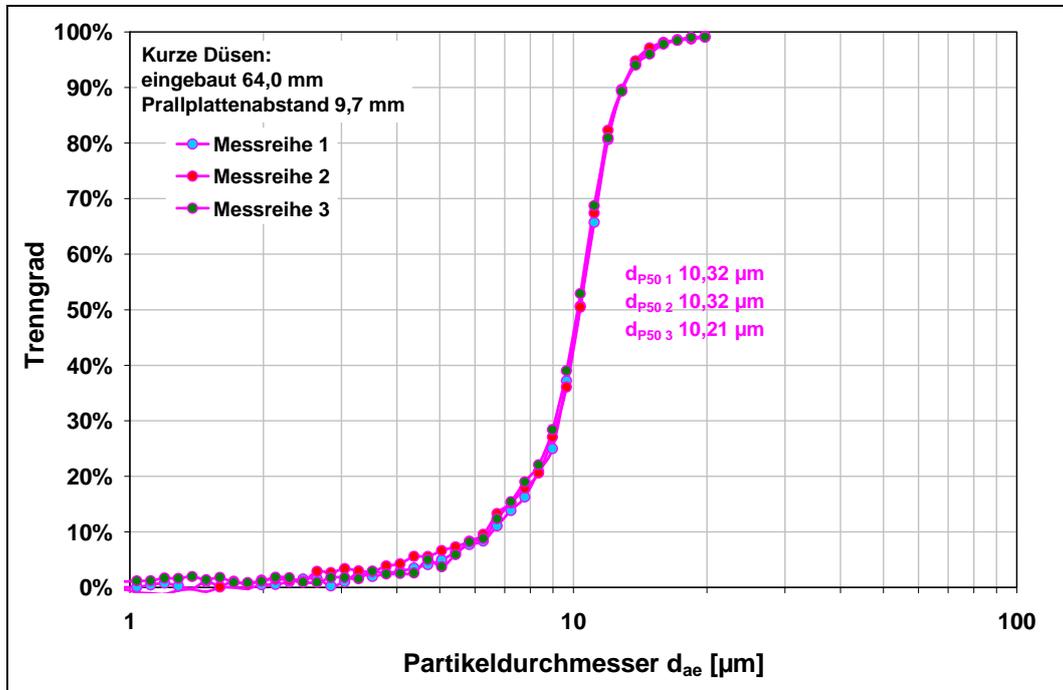


Abbildung 13: Trenngradkurven für den Düsenatz 3 ($\varnothing 10 \text{ mm}$ verjüngt auf $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $9,7 \text{ mm}$) der 3 Messreihen

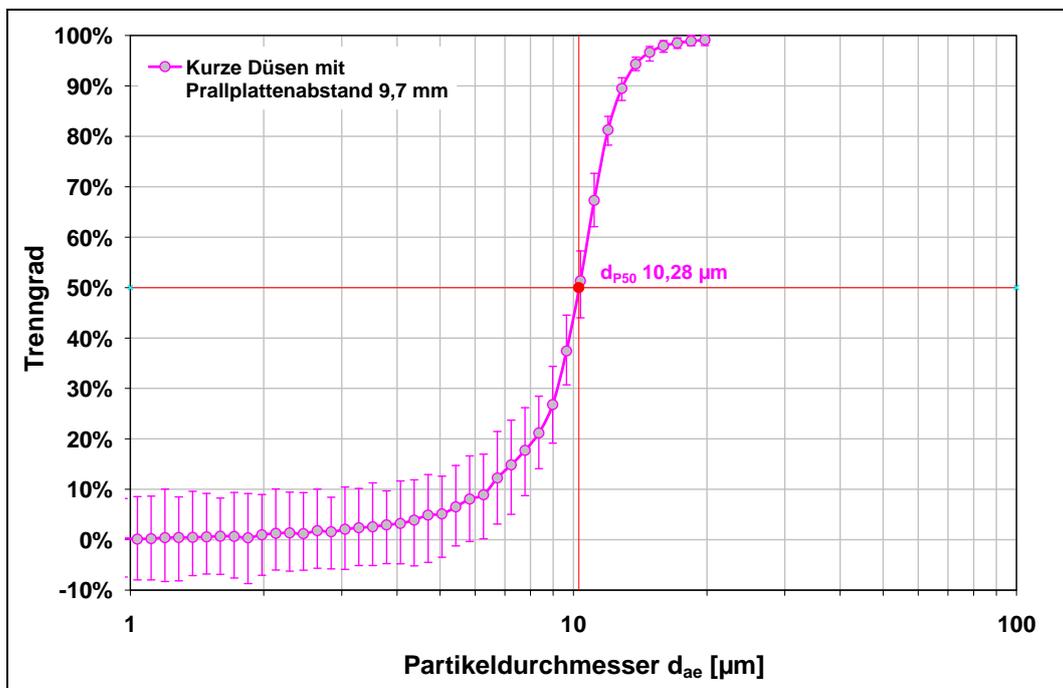


Abbildung 14: Gemittelte Trenngradkurve für den Düsenatz 3 ($\varnothing 10 \text{ mm}$ verjüngt auf $\varnothing 6,5 \text{ mm}$, Prallplattenabstand $9,7 \text{ mm}$), die Fehlerbalken geben die 10. und 90. Perzentile aller Einzeltrenngrade aus den 3 Messreihen an.

Für den Düsensatz 3 ergibt sich zusammengefasst ein cut-off von $d_{p50}=10,28 \mu\text{m}$. Die Steilheit der Trenngradkurve ergibt sich zu 1,28.

	d_{p50}	R^2	Steilheit
Messreihe 1	10,32 μm	1,000	1,26
Messreihe 2	10,32 μm	0,999	1,28
Messreihe 3	10,21 μm	1,000	1,30
Gesamt	10,28 μm	1,000	1,28

Tabelle 5: Ermittlung des d_{p50} für den Düsensatz 3 (\varnothing 10 mm verjüngt auf \varnothing 6,5 mm, Prallplattenabstand 9,7 mm) durch lineare Regression der Trenngradkurven im Partikelgrößenbereich von 9,31-11,58 μm

Zusammengefasst sind die Messergebnisse in Tabelle 6 eingetragen.

Düsensatz	1	2	3
	Lange Düsen	Kurze Düsen	Kurze Düsen
Düsensdurchmesser	\varnothing 6,5 mm	\varnothing 10 \Rightarrow 6,5 mm	\varnothing 10 \Rightarrow 6,5 mm
Abstand zur Prallplatte	10,7 mm	8,0 mm	9,7 mm
Cut-off d_{p50}	9,73 μm	10,16 μm	10,28 μm
Steilheit $(d_{p84}/d_{p16})^{0,5}$	1,38	1,27	1,28

Tabelle 6: Zusammenfassung der Trenngradermittlungen von 3 verschiedenen Düsensätzen

Danach ergibt sich, dass die cut-offs, die mit den 3 verschiedenen Düsensätzen ermittelt wurden, alle in einem Toleranzbereich von $10 \mu\text{m} \pm 5 \%$ (9,5-10,5 μm) liegen.

Die Steilheiten der Trenngradkurven berechnen sich zu Werten im Bereich 1,27-1,38. Ein Vergleich mit Werten aus der Literatur ergibt, dass diese Kurven steiler verlaufen als die Vorgaben aus der DIN EN 481 [12] oder U. S. EPA [13]. In Abbildung 15 sind zusätzlich zu den Trennkurven der PM₁₀-Vorabscheider mit den verschiedenen Düsensätzen noch die vorgegebene thorakale Abscheidekurve nach DIN EN 481 und Abscheidewerte der U. S. EPA eingezeichnet. Die Kurve nach DIN EN 481 verläuft mit einem Steilheitswert von 1,74 flacher als die hier ermittelten PM₁₀-Vorabscheider-trenngradkurven. Die Werte der U. S. EPA korrespondieren recht gut mit der Abscheidekurve nach DIN EN 481.

Weiterhin ergibt sich, dass der Trenngradverlauf mit den langen Düsen etwas flacher verläuft als mit den kurzen Düsen. Für Partikel $> 10 \mu\text{m}$ ergeben sich dadurch für die langen Düsen niedrigere Trenngradwerte, was sich in der Massenkonzentration bemerkbar machen müsste.

Beim Vergleich der Trenngradkurven für kurze Düsen mit unterschiedlichem Prallplattenabstand kann beim größeren Prallplattenabstand nur ein leicht höherer cut-off und eine nur sehr geringfügig flachere Kurve erkannt werden. Tendenziell ist zwar zu erwarten, dass sich bei Vergrößerung des Abstands Düse-Prallplatte ein höherer cut-off und ein flacherer Kurvenverlauf bilden. Die hier dokumentierten Unterschiede bei Vergrößerung des Prallplattenabstands um 1,7 mm sind so gering, dass sie keinesfalls als signifikant zu bezeichnen sind.

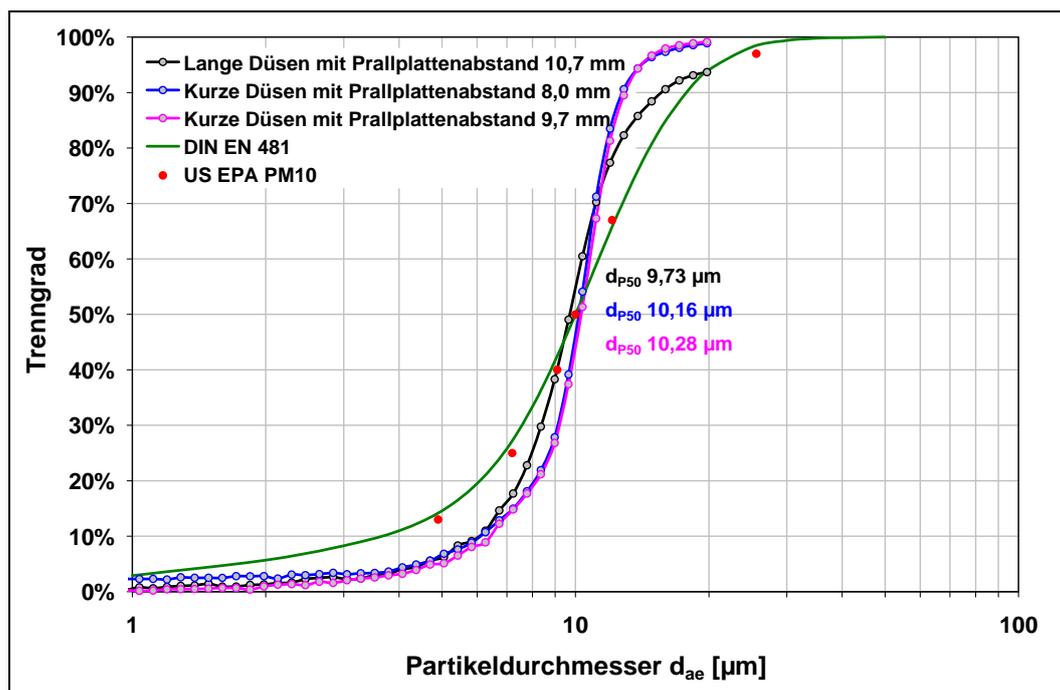


Abbildung 15: Trenngradkurven der PM₁₀-Vorabscheider mit den 3 verschiedenen Düsensätzen im Vergleich zu Trenngradkurven aus der Literatur

7 Modellrechnungen

Da die verschiedenen Düsensätze des HLUg in PM₁₀-Vorabscheider gleicher Gehäusebauart im Rahmen der Luftqualitätsüberwachung eingesetzt werden, wurde zur Abschätzung der möglichen Abweichung der Düsensätze untereinander, Modellrechnungen mit Modellstäuben zur Bestimmung der Massenkonzentration durchgeführt. Weil der Trenngrad partikelgrößenabhängig ist, wurden zur Modellrechnung 2 Partikelgrößenverteilungen angenommen, die in der Größenverteilung sehr unterschiedlich sind. Der erste Modellstaub (CaCO₃, Dichte 2,7 g/cm³) stellt eine extreme Verteilung dar und soll die Massengrößenverteilung simulieren, wie sie in der Nähe von Grobstaubquellen (z. B. von Steinbrüchen) vorliegen kann. Der zweite Modellstaub soll eine Massengrößenverteilung simulieren, wie sie im atmosphärischen Aerosol

(Außenluft) zu finden ist (Dichte 1,6 g/cm³). Die angenommenen Anzahl- und Massengrößenverteilungen sind in Abbildung 16 dargestellt.

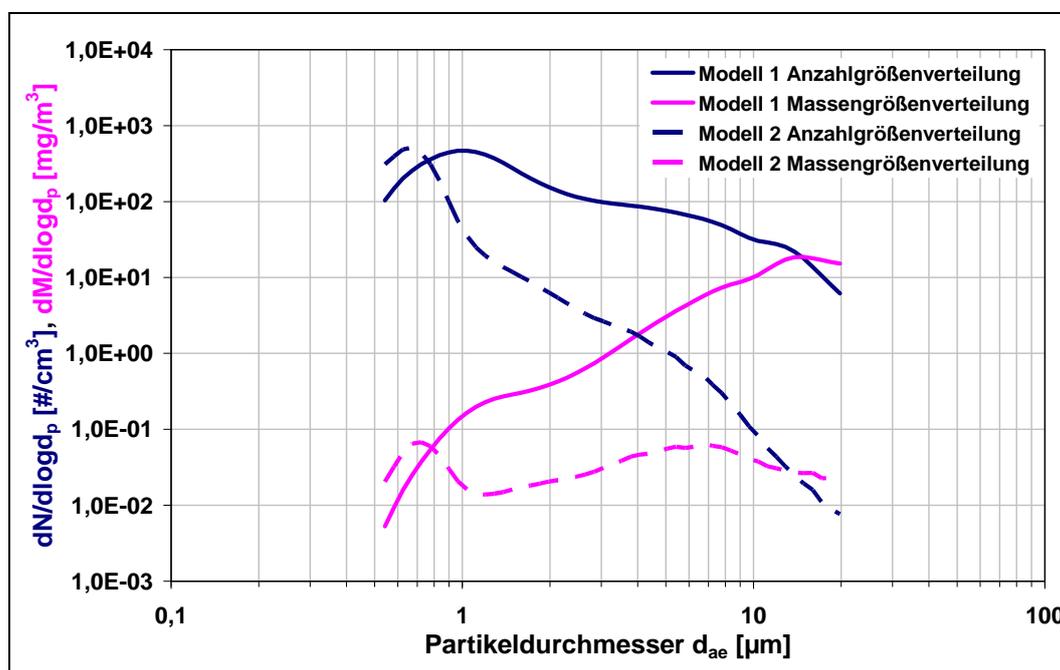


Abbildung 16: Anzahl- und Massengrößenverteilungen der Modellstäube

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Danach ergibt sich für den Modellstaub 1 bei der gezeigten Anzahlgrößenverteilung und einer Dichte von 2,7 g/cm³ eine aufgegebene Massenkonzentration (in Tabelle 7 als TSP bezeichnet) von 7,44 mg/m³, die vom PM₁₀-Vorabscheider mit dem Düsensatz 1 (lange Düsen) auf 2,72 mg/m³ (in Tabelle 7 als PM₁₀ bezeichnet) reduziert wird. Die Düsensätze 2 und 3 vermindern die aufgegebene Massenkonzentration auf 2,54 mg/m³ und 2,60 mg/m³. Dies entspricht gegenüber dem Düsensatz 1 einer Massenkonzentration, die um 6,55 % bzw. 4,57 % niedriger liegt. Dies ist auch plausibel, da die kurzen Düsen für die Partikel größer 10 µm höhere Trenngrade aufweisen als die langen Düsen und die Massengrößenverteilung das Maximum bei Partikeln > 10 µm bildet. Die Unterschiede beim Vergleich der kurzen Düsensätze können durch den geringfügig größeren cut-off und den leicht flacheren Verlauf der Trenngradkurve erklärt werden.

Für den Modellstaub 2, der die Außenluft abbilden soll, ergibt sich mit der gezeigten Anzahlgrößenverteilung und einer Dichte von 1,6 g/cm³ eine aufgegebene Massenkonzentration von 56,28 µg/m³. Diese wird vom PM₁₀-Vorabscheider mit den langen Düsen auf 45,22 µg/m³ verringert, mit den kurzen Düsen 2 auf 45,08 µg/m³ und den kurzen Düsen 3 auf 45,85 µg/m³. Die Unterschiede in der Abtrennung mit den kurzen Düsen gegenüber den langen Düsen sind nur geringfügig. Dementsprechend liegt die mit den langen Düsen bestimmte Konzentration gegenüber den „kurzen Düsen 2“

um nur 0,3 % höher und gegenüber der Variante mit etwas größerem Prallplattenabstand (kurze Düsen 3) um 1,4 % niedriger.

Düsensatz	1	2	3
	Lange Düsen	Kurze Düsen	Kurze Düsen
Düsendurchmesser	Ø 6,5 mm	Ø 10 ⇒ 6,5 mm	Ø 10 ⇒ 6,5 mm
Abstand zur Prallplatte	10,7 mm	8,0 mm	9,7 mm
Modellstaub 1 (z. B. Steinbruch)			
TSP	7,44 mg/m ³	7,44 mg/m ³	7,44 mg/m ³
PM ₁₀	2,72 mg/m ³	2,54 mg/m ³	2,60 mg/m ³
Abweichung	-	-6,55 %	-4,57 %
Modellstaub 2 (z. B. Außenluft)			
TSP	56,28 µg/m ³	56,28 µg/m ³	56,28 µg/m ³
PM ₁₀	45,22 µg/m ³	45,08 µg/m ³	45,85 µg/m ³
Abweichung	-	-0,30 %	+1,39 %

Tabelle 7: Zusammenfassung der Modellrechnungen

8 Literatur

- [1] DIN EN 12341: Ermittlung der PM₁₀-Fraktion von Schwebstaub, Referenzmethode und Feldprüfverfahren zum Nachweis der Gleichwertigkeit von Messverfahren und Referenzmessmethode, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Deutsche Fassung EN 12341, März 1999
- [2] DIN EN 14907: Luftbeschaffenheit - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{2,5}-Massenfraktion des Schwebstaubs, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Deutsche Fassung EN 14907, November 2005
- [3] VDI-2066 Blatt 1: Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, November 2006
- [4] DIN ISO 2867-1: Allgemeintoleranzen: Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung, Juni 1991
- [5] John, A. C., Kuhlbusch, T. A. J., Fissan, H.: Thermodynamic influences on size fractionated measurements (PM_{2,5}, PM₁₀) of ambient aerosols, Journal of Environmental Monitoring, 1, pp. 409-412, 1999
- [6] APS Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, Instruction Manual, TSI GmbH, December 2001
- [7] Feststoffdispergierer RBG-1000, Bedienungsanleitung, Palas[®] GmbH, Karlsruhe, Februar 2002
- [8] Datenblätter Eskal 500, Eskal 10, Eskal 20, KSL Staubtechnik GmbH, Launing, Februar 2002
- [9] Kleinfiltergerät LVS3.1/PNS3.1-15, Bedienungsanleitung, Edition 01.03d, Ingenieurbüro Norbert Derenda, Tetlow, 2003
- [10] 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
- [11] 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
- [12] DIN EN 481: Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung von luftgetragenen Partikeln, September 1993
- [13] U. S. Environmental Protection Agency: National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Federal Register 40 CFR Parts 50, 53, 58, July 18, 1997.
- [14] Hinds, W. C.: Aerosol Technology – Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1999
- [15] Fuchs, N. A.: The Mechanics of Aerosols, Pergamon Press, New York, 154, 1964