

Entwicklung eines Low-Cost PM Sensorenclusters zur Untersuchung des Abscheideverhaltens eines Nassabscheiders

Felix Reinke¹, Michael Novosel², Jörg Meyer¹ und Achim Dittler¹

¹Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

²ESTA Apparatebau GmbH & Co. KG, Senden, Deutschland
Kontakt: felix.reinke@kit.edu

Einleitung

Durch Fortschritte der metallischen Zerspanungsverfahren (Schleifen, Bürsten, Polieren etc.) kommt es zur Entstehung von submikronen Partikelstäuben, deren Abscheidung immer komplexer wird. Treten alveolengängige Stäube auf (vornehmlich PM₁ und PM_{2,5} Fraktion), bedarf es einer im Prozess integrieren Abscheidung, welche jedoch mit einem zusätzlichen Druckverlust des Gesamtsystems einhergeht und den notwendigen Energieeintrag erhöht. Aus diesem Grund sind neuartige Technologien erforderlich, welche bei minimalem Energieeintrag eine hohe Abscheideeffizienz (im Bereich der submikronen Partikeln) erreichen. Eine Möglichkeit können hierbei nassabscheidende Verfahren mit innovativen 3D-gedruckten Düsengeometrien zur Dispergierung der Waschflüssigkeit bieten.

Zur kostengünstigen Beurteilung der Abscheideeffizienz der Partikelfractionen und zum besseren Verständnis von lokalen Partikelkonzentrationsniveaus können sogenannte Low-Cost PM-Sensoren lokal in den Nassabscheider eingebaut werden. Diese haben sich bereits im Anwendungsfeld der Immissionsmessung und Emmisionscharakterisierung zur Erfassung der zeitlichen und lokalen Partikelkonzentration etabliert. [1] Aufgrund der vorherrschenden Betriebsbedingungen bei der Nassabscheidung kann allerdings die qualitative Aussagekraft der Sensordaten durch zeitlich abweichende Quereinflüsse (z.B: relative Luftfeuchte) beeinflusst werden. [2]

Im Zuge dieses Beitrags soll die Methodik zur Entwicklung eines Sensorenclusters Low-Cost PM-Sensoren zur Untersuchung des lokal aufgelösten Abscheideverhaltens in einem Nassabscheider vorgestellt werden. Mit Hilfe der aus dieser Versuchsmethodik gewonnen experimentellen Daten soll zukünftig ein adaptiver Nassabscheider entwickelt werden, welcher sich entsprechend der vorherrschenden Randbedingungen (z.B. Partikelkonzentration, Strömungsverhältnisse) anpasst und somit bei multiplen Betriebspunkten fähig ist, im energieeffizienten Optimum bei maximaler Abscheideleistung betrieben zu werden.

Hierzu soll zunächst anhand von theoretischen Grundlagen die zu untersuchende Aerosolstreulichpartikelmessstechnik erläutert werden. Anschließend folgt eine Vorstellung der verwendeten

Partikelmessstechnik. Daraufhin soll die grundlegende Vorgehensweise zur systematischen Charakterisierung der qualitativen Aussagekraft der Sensordaten vorgestellt werden.

Grundlagen und Materialien

Nassabscheider

Grundsätzlich basieren Abscheider auf dem Prinzip, dass die Bahnkurven, auf denen sich die Partikel im Fluid bewegen, zu Bereichen oder Flächen führen müssen, von denen die Partikel durch die kontinuierliche Phase nicht mehr weggeführt werden können. Diese Bereiche bzw. Flächen werden als Kollektoren bezeichnet. In der Nassabscheidung dient die Tropfenoberfläche als Kollektor. Sobald eine Partikel auf einen Tropfen trifft, kann nach Weber [3] angenommen werden, dass diese haften bleiben. Das dadurch gebildete Partikel-Tropfen-Agglomerat lässt sich, aufgrund der erhöhten Masse im Vergleich zur Partikel, besser mit Hilfe von beispielsweise trägheitsbasierten Abscheidemechanismen aus dem Gasstrom entfernen. [4]

Die in einem Nassabscheider ablaufenden Vorgänge können in vier Bereiche eingeteilt werden:

- Dispergierung der Waschflüssigkeit im Aerosolstrom
- Kollision der dispersen Phase mit den Tropfen
- Haftung der Partikeln an der Tropfenoberfläche
- Abscheidung der partikelbeladenen Tropfen stromabwärts

Nassabscheider unterscheiden sich zum einen in der Art der Tropfenerzeugung und zum anderen in der Art der Vermischung des Aerosols mit der Waschflüssigkeit. Beim zu untersuchenden Nassabscheider zerstäubt die Waschflüssigkeit in der Kontaktzone durch Ansaugung und Überströmung der Flüssigkeit.

Messtechnische Grundlagen

Zur online Messung von Partikelkonzentrationen in einem Gasstrom finden unter anderem optische Verfahren Anwendung. [5]

Dabei erfolgt eine Unterscheidung in abbildende Verfahren und Streulichtverfahren. Da die im Rahmen dieser Studie verwendete Partikelmessstechnik ausschließlich auf dem Streulichtverfahren basiert findet nachstehend lediglich eine Betrachtung dieses Verfahrens statt.

Das Messprinzip der Streulichtmesstechnik basiert auf der Streuung einer Lichtwelle mit der Wellenlänge λ an einer kugelförmigen Partikel mit dem Durchmesser d und dem Brechungsindex n . Aufgrund von Beugung, Reflexion und Brechung findet eine Richtungsänderung der Ausbreitung des Lichts statt. Abbildung 1 stellt die Lichtstreuung an einer Einzelpartikel dar. Zusätzlich ist sowohl der Streuwinkel θ , als auch der Polarisationswinkel ϕ aufgetragen. [6]

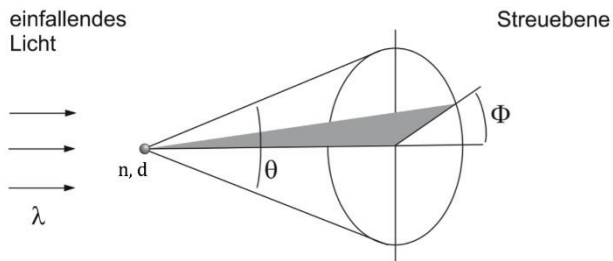


Abbildung 1 - Schematische Darstellung der Streuung einer Lichtwelle an einer Partikel. λ steht hierbei für die Lichtwellenlänge, n für den Brechungsindex, d für den Partikeldurchmesser, θ für den Detektionswinkel des Streulichts und ϕ für den Polarisationswinkel der gestreuten Lichtwelle. Nach [4].

Aus Abbildung 1 ist erkennbar, dass die Lichtstreuungseffekte Funktionen der Partikeleigenschaften, der Wellenlänge des Lichtes und dessen Verhältnis zueinander sowie des Streuwinkels zwischen Beobachter und Beleuchtungsrichtung sind. Zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen Partikelgröße und Wellenlänge wird ein Streuparameter α eingeführt:

$$\alpha = \pi d / \lambda$$

Die Intensität I des am Einzelpartikel gestreuten Lichts ergibt sich demnach aus der Intensität I_0 des auf die Partikel treffenden Lichtes, dem Polarisationswinkel, dem Detektionswinkel, dem Brechungsindex m und dem Streuparameter α . Die relative Streulichtintensität I^* stellt sich wie folgt dar:

$$I^* = I/I_0 = f(\phi, \theta, n, \alpha).$$

Mittels des Streuparameter α lassen sich die theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Partikelgrößen- und Winkelabhängigkeit der Streulichtintensität in folgende drei Bereiche aufteilen [7]:

- $\alpha \ll 1$; Rayleigh-Bereich
- $\alpha \approx 1$; Mie-Bereich
- $\alpha \gg 1$; Fraunhofer-Bereich

In Abbildung 2 ist die relative Streulichtintensität I^* über den Streuparameter α für monochromatisches Licht und einem festen Streuwinkel aufgetragen und die unterschiedlichen Bereiche des Streuparameters α gekennzeichnet.

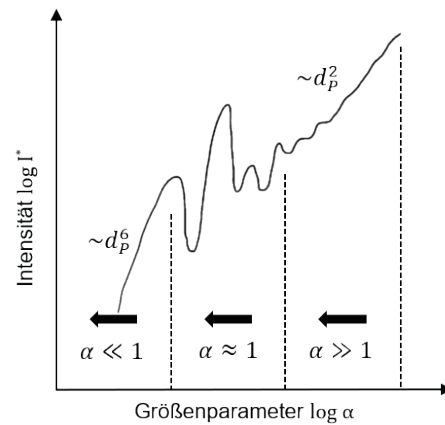


Abbildung 2 - Schematische Darstellung des Zusammenhangs der Streulichtintensität über den Größenparameter α . Zusätzlich sind die drei unterschiedlichen Bereiche der Streulichtintensität ($\alpha \ll 1$; $\alpha \approx 1$; $\alpha \gg 1$) und deren Proportionalität zum Partikeldurchmesser aufgetragen. Nach [7].

Die in Abbildung 2 dargestellte Abhängigkeit der relativen Streulichtintensität weist im Rayleigh Bereich ($\alpha \ll 1$) eine Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser in der sechsten Potenz auf. Im Bereich der geometrischen Optik ($\alpha \gg 1$), besteht eine quadratische Abhängigkeit der Streulichtintensität zum Partikeldurchmesser. Im Mie-Bereich ($\alpha \approx 1$) sind starke Schwankungen zu erkennen und eine eindeutige Zuordnung der Streulichtintensität zur Partikelgröße ist allgemein nicht möglich. Das bedeutet, dass in der messtechnischen Anwendung einer gemessenen Lichtintensität mehr als eine Partikelgröße zugeordnet werden kann.

Zur Partikelmessung im Mie-Bereich besteht die Möglichkeit, unter Verwendung von weißem Licht mit 90° Streulichtdetektion, eine Glättung der Kurve (vgl. Abbildung 2) zu erreichen und somit eine eindeutige Zuordenbarkeit zwischen gemessener relativer Streulichtintensität und Partikelgröße herzustellen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin mittels monochromatischen Lichts mit 90°-Streulichtdetektion und einer Approximationsfunktion einen angenäherten Zusammenhang zu erhalten. [8]

Zur Ermittlung der Partikelgröße mittels Streulichtverfahren ist das Reflexionsverhalten und die Brechung der Wellen beim Auftreffen einer Phasengrenzfläche relevant. Dieses Verhalten wird durch den Brechungsindex m beschrieben. Der Brechungsindex setzt sich aus einem Real- und einem Imaginärteil zusammen. Der Realteil ist hierbei der maßgebliche Parameter für die Lichtstreuung und der Imaginärteil beschreibt das Reflexionsverhalten. Unter der Annahme, dass das Reflexionsverhalten bei den zu untersuchenden Stoffen vernachlässigbar ist, ergibt sich der Brechungsindex als Verhältnis von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c zur Lichtgeschwindigkeit im Partikel v_p zu

$$n = c/v_p.$$

Aufbau Streulichtmesstechnik

Der schematische Aufbau eines Streulichtpartikelzählers ist in Abbildung 3 dargestellt. Darauf ist eine exemplarische Messkammer, eine Lichtquelle, die Aerosolzufuhr und Absaugung, sowie die Lichtfalle, ein Verstärker und ein Detektor abgebildet. Des Weiteren ist das Messvolumen gekennzeichnet. Über die Aerosolzufuhr, wird das zu untersuchende Aerosol in definierter Menge in die Messkammer bzw. in das Messvolumen gesaugt. Beim Auftreffen des Lichtstrahls mit einer Partikel wird dieser gestreut. Daraufhin findet eine messtechnische Detektion der Streuung statt. Anschließend wird die detektierte Streuung in ein elektrisches Signal umgewandelt und verstärkt. [9]

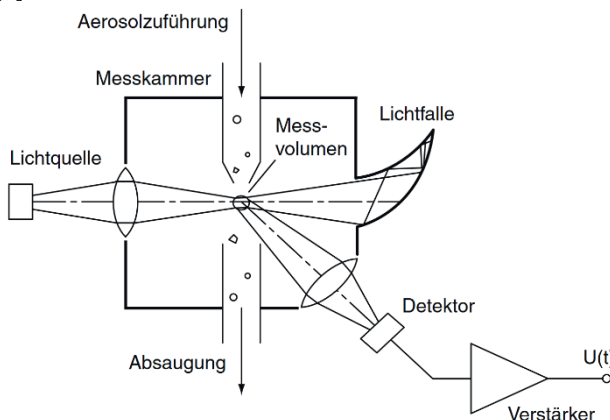


Abbildung 3 - Schematischer Aufbau eines Streulichtpartikelzählers. Dargestellt ist die Aerosolzuführung und -absaugung, eine Lichtquelle mit Detektor und Signalverstärker, sowie das Messvolumen und die Lichtfalle. [7]

Zur Vermeidung von Koinzidenzfehlern sollte bei einer Messung mit Streulichtpartikelzählern darauf geachtet werden, dass sich immer nur eine Partikel im Messvolumen während der Signalverarbeitung befindet. Bei Mehrfachdetektion von Partikeln werden mehrere Partikeln als ein großes Partikel erfasst, da keine eindeutige Zuordnung des Signals zur Partikelgröße stattfindet. Dadurch kommt es zu einer Fehlinterpretation der Partikelkonzentration und -größe. Koinzidenzfehler können durch die Wahl eines geeigneten Messvolumens reduziert werden. Dabei gilt, je kleiner das Messvolumen, desto höher ist die Partikelanzahlkonzentrationen die mit dem Gerät gemessen werden kann. [7]

Zusätzlich zu den Koinzidenzfehlern kann es zu Randzonenfehlern im Messvolumen kommen. Diese treten auf, wenn eine Partikel am Rand des Messvolumens eine deutlich geringere Streulichtintensität aufweist, wie eine Partikel selber Art im Zentrum des Messvolumens.

Aerosolmesstechnik

Die in diesem Beitrag verwendete Aerosolmesstechnik basiert auf dem Streulichtprinzip. Dabei wird ein HC-Sensor (High-Cost Sensor) als etablierte

Referenzpartikelmesstechnik verwendet, während die Tauglichkeit eines Low-Cost PM-Sensors (LC-Sensor) für die Anwendung der Emissionsüberwachung im Bereich der Nassabscheidung untersucht werden soll. Die von den Herstellern angegeben technischen Daten des jeweiligen Sensors sind auszugsweise in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei fallen zunächst die Unterschiede bzgl. der Abmessungen und des Gewichts der Sensoren auf. Des Weiteren besteht die Möglichkeit bei der verwendeten Referenzmesstechnik (HC-Sensor) größen aufgelöst zu messen, während beim LC-Sensor lediglich fünf Größenkanäle zur Verfügung stehen. Außerdem ist der Anwendungsbereich der Referenzmesstechnik aufgrund einer beheizbaren Zulaufstrecke und variablen Einstellmöglichkeiten bzgl. beispielsweise Strömungsgeschwindigkeiten zur Gewährleistung einer isokinetischen Probenahme deutlich größer. Diese Variabilität spiegelt sich auch in der Verarbeitbarkeit der Messdaten wieder. Beim LC-Sensor gibt es keine Möglichkeit partikelmaterialspezifische Eigenschaften wie den Brechungsindex oder die Partikeldichte zu variieren. Ein weiterer messtechnisch relevanter Unterschied ist die Verwendung der Lichtquelle. Der HC-Sensor verwendet eine Weißlichtquelle und der LC-Sensor monochromatisches Licht. Wie bereits im Abschnitt „Messtechnische Grundlagen“ erklärt, unterscheiden sich die beiden Lichtquellen in der Art der Zugänglichkeit des Zusammenhangs zwischen relativer Streulichtintensität und dem Mie-Größenparameter.

Tab. 1: Technische Daten der verwendeten Partikelmesstechnik

Sensortyp	HC-Sensor	LC-Sensor
Maße / mm	50 x 250 x 100	41 x 41 x 12
Gewicht / g	2800	6
Messbereich / μm	0,2 – 40 3 Bereiche	0,3 – 10
Messgrößen	Partikelgrößenverteilung, Partikelanzahl	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₁₀ , Partikelanzahl
Größenkanäle	64 bins	5 bins
Max. Anzahlkonzentration / cm^{-3}	$5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$
Betriebstemperatur / °C	≤ 250	-10 – 60
Max. rel. Luftfeuchte	heizbar	80 %
Brechungsindex	variabel	konstant
Lichtquelle	Weißlicht	Monochromatisch
Partikeldichte	variabel	konstant
Max. Strömungsgeschwindigkeiten / ms^{-1}	variabel über isokinetische Probenahmen	1
Aufzeichnungsrate / Hz	1	1
Kosten / €	~ 30.000	~ 40

Zusätzlich gibt Sensor 1 ebenfalls an, ob bzw. wie hoch der Koinzidenzfehler der aktuellen Messung ist. Diese Möglichkeit bietet LC-Sensor 2 nicht. Wie hier

Tab. 2: Versuchsbedingungen in den verschiedenen Bereichen der Anlage

Bereich	Rohgas	Tropfenabscheider	Endfilter
v / ms^{-1}	9 – 35	0,58 – 4,72	0,27 – 4,06
rF / %	Umgebung	64,8 – 88,2	49,4 – 69,5
T / °C	Umgebung	19,9 – 22,9	22,2 – 27,2

Überprüfung von systematischen Abweichungen zwischen den Sensoren

Zur Überprüfung der systematischen Abweichung der LC-Sensoren werden diese in einer Testkammer mit einem Volumen von 1 m³ unter regulierbaren Feuchtebedingungen mit Partikeln beaufschlagt. Im Rahmen dieser Versuchsreihe werden acht LC-Sensoren untereinander und zur Referenzmesstechnik (HC-Sensor) verglichen. Hierbei werden sowohl Versuche bei Umgebungsbedingungen bei relativen Feuchten (rF) <80% und bei relativen Feuchten (rF) >80% durchgeführt. Mittels dieser Vorgehensweise soll ein etwaiger Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Messqualität der LC-Sensoren untersucht werden. Die Partikelzugabe erfolgt mittels Bürstendosierer auf ein Anzahlkonzentrationsniveau von 6000 cm⁻³. Dies entspricht der zweifachen Messgrenze der Sensoren von Typ 2. Hierbei soll untersucht werden, inwiefern die Sensoren von Typ 2 auch außerhalb der vom Hersteller spezifizierten Messgrenze qualitative Aussagen bzgl. der vorherrschenden Partikelkonzentrationsniveaus treffen können. Bevor die Partikeln in die Versuchskammer gelangen, werden Partikeln >PM_{2,5} Fraktion abgeschieden. Aufgrund des konstanten Probenahmevolumenstroms des HC-Sensors verhält sich die Konzentrationsabnahme in der Versuchskammer analog zu dem Konzentrationsverlauf in einem idealen Reaktor mit Rührkesselcharakteristik (CSTR). Mittels des in der Versuchskammer verbauten Ventilators, kann eine ideale Vermischung der Partikeln angenommen und eine Sedimentation ausgeschlossen werden.

Untersuchung der qualitativen Aussagekraft der Messdaten

Im Anschluss an die systematische Überprüfung der Abweichung zwischen den Sensoren und der Referenzmesstechnik werden diese an den zuvor aus der Charakterisierung der Versuchsanlage bestimmten Messposition verbaut und mit der Referenzmesstechnik abgeglichen. Hierbei sollen Messpositionen identifiziert werden, bei denen die LC-Sensoren zuverlässige Messdaten liefern können.

Zielsetzung

Mit Hilfe der vorgestellten Methodik soll ein Low-Cost PM-Sensorencluster entwickelt werden, welches in der Lage ist online Messdaten in

ausreichender Qualität bereitzustellen um zu jedem Zeitpunkt eine Aussage bzgl. der vorherrschenden Partikelkonzentrationen im Prozess zu erhalten. Zukünftig kann dieses Cluster das Potential bieten einen adaptiven Abscheideprozess zu entwickeln, welcher mittels der Kenntnis der lokalen Partikelkonzentrationsniveaus in der Lage ist, im energetischen Optimum unter Kenntnis der Abscheideleistung betrieben zu werden.

Literatur

- [1] P. Bächler, J. Meyer, and A. Dittler, "Characterization of the emission behavior of pulse-jet cleaned filters using a low-cost particulate matter sensor/Charakterisierung der Emission von druckstoßgereinigten Oberflächenfiltern mit einem Low-Cost-Feinstaubsensor," *GrdL*, vol. 79, 11-12, pp. 443–450, 2019, doi: 10.37544/0949-8036-2019-11-12-49.
- [2] A. Samad, F. E. Melchor Mimiaga, B. Laquai, and U. Vogt, "Investigating a Low-Cost Dryer Designed for Low-Cost PM Sensors Measuring Ambient Air Quality," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21, no. 3, 2021, doi: 10.3390/s21030804.
- [3] E. Weber, "Definition des Benetzungsverhaltens heterogener Stäube und dessen Einfluß auf die Naßentstaubung," [Online]. Available: <http://swb.bsz-bw.de/DB=2.1/PPN?PPN=1125677511>
- [4] F. Löffler, *Staubabscheiden: 34 Tabellen*. Stuttgart: Thieme, 1988.
- [5] P. Bächler, J. Szabadi, J. Meyer, and A. Dittler, "Simultaneous measurement of spatially resolved particle emissions in a pilot plant scale baghouse filter applying distributed low-cost particulate matter sensors," *Journal of Aerosol Science*, vol. 150, p. 105644, 2020, doi: 10.1016/j.jaerosci.2020.105644.
- [6] M. Kuhl, *Entwicklung von Aufgabesystemen zur Charakterisierung pharmazeutischer Aerosole mit einem optischen Partikelzähler*, 2009. [Online]. Available: https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00004378
- [7] H.-R. Tränkler and E. Obermeier, Eds., *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [8] M. Stiess, *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1544055>
- [9] L. Gail and U. Gommel, Eds., *Reinraumtechnik*, 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/>