

**Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren
zur Charakterisierung von Aerosolen
unter industriellen Bedingungen**

**Karlheinz Schaber
Andreas Schenkel
Richard A. Zahoransky**

Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren zur Charakterisierung von Aerosolen unter industriellen Bedingungen

Karlheinz Schaber, Andreas Schenkel und Richard A. Zahoransky

Schlagwörter: In-situ-Meßsystem, On-line-Meßsystem, Extinktionsverfahren, Partikelgröße, Aerosol

Ein neuentwickeltes, kommerziell verfügbares In-situ- und On-line-Meßsystem zur Bestimmung von Partikelgrößen und Konzentrationen von Aerosolen wurde an die Bedingungen industrieller Abgasreinigungsanlagen angepaßt und zur Charakterisierung von Salzsäure-, Schwefelsäure- und salzhaltigen Flüssigkeitsnebeln benutzt. Das Meßverfahren beruht auf dem Drei-Wellenlängen-Extinktionsprinzip. Die mit dem laseroptischen Meßgerät gewonnenen Ergebnisse wurden mit Kaskadenimpaktormessungen am Beispiel von Siliziumstaub und Ölnebel sowie mit naßchemischen Analysen am Beispiel von Säureaerosolen verglichen. Die Übereinstimmung der verschiedenen Meßmethoden kann als gut bezeichnet werden. Das neue Meßverfahren hat sich insbesondere für Flüssigkeitsaerosole im Bereich hoher Partikelkonzentrationen bis 10^9 Teilchen pro cm^3 bewährt.

Three-wavelength extinction technique for characterizing aerosols under industrial conditions

A new developed in-situ and on-line measuring device has been adapted to the conditions of industrial gas cleaning equipment in order to realize measurements of particle sizes and concentrations of aerosols. It has been used to characterize hydrochloric acid, sulphuric acid and salt solution droplets. The measuring method is based on the three-wavelength extinction technique. The results, which have been achieved with this method, have been compared with measurements of a particle sampler for silizium dust and oil droplets and with chemical analysis for acid aerosols. There has been good agreement between the different measuring techniques. The method has successfully been tested in particular for liquid aerosols with high particle concentrations up to 10^9 particles/ cm^3 .

1 Einleitung

In vielen industriellen Anlagen entstehen Aerosole, die erhebliche Probleme in der Abluft oder in nachgeschalteten Prozessen verursachen können, da die unter bestimmten Prozeßbedingungen gebildeten Nebel oder Rauche oftmals schwer abscheidbare Teilchen teilweise mit Durchmessern kleiner $1 \mu\text{m}$ enthalten. Typische

Beispiele hierfür sind Säurenebel oder Salzrauche in Absorptionsanlagen oder in Rauchgaswäschern nach Abfallverbrennungsprozessen, Ölnebel bei Vakuumpumpen oder Lösungsmittelnebel in Tiefkühlkondensationsanlagen [1].

Zur optimalen Auslegung von in solchen Fällen geeigneten Aerosolabscheidesystemen fehlen bislang ausreichende Informationen über Partikelgrößen und Partikelkonzentrationen der entsprechenden Aerosole. Ein Hauptgrund hierfür ist sicherlich die schwierige meßtechnische Erfassung insbesondere von Flüssigkeitsaerosolen. Probenehmende Meßverfahren können nur sehr bedingt eingesetzt werden, da die Aerosole bei der Teilstromentnahme ihre Größe verändern können. Dies geschieht durch Agglomeration und bei Säureaerosolen insbesondere durch Kondensation bzw. Verdampfung, wenn bei der Probenahme die Temperatur und damit die relative Feuchte nicht konstant bleibt. Es sollte also im Hauptstrom gemessen werden. Die Partikelkonzentrationen der Aerosole sind in der Praxis aber oftmals so groß, daß einzelpartikelzählende Verfahren für eine In-situ-Messung ungeeignet sind. So können beispielsweise, wie eigene Messungen zeigen, nicht selten Partikelkonzentrationen von $10^9/\text{cm}^3$ auftreten. Die mit einem Einzelpartikelzähler maximal meßbare Konzentration liegt bei ca. $10^5/\text{cm}^3$ [2]. Diese Meßgrenze ist vorhanden, da sich immer nur ein Teilchen in einem bestimmten optisch abgegrenzten Meßvolumen des Meßgeräts befinden darf. Bei einer Teilchenzahl von $10^5/\text{cm}^3$ muß ein kubisches Meßvolumen mit einer Kantenlänge von $100 \mu\text{m}$ abgegrenzt werden. Eine kleinere Wahl ist in der Regel nicht möglich.

Für das geschilderte Meßproblem eignen sich deshalb integrale Meßverfahren besser. Der bekannteste Vertreter der integralen Meßverfahren – die Laserbeugungsspektrometrie – ist allerdings für eine In-situ-Messung in Rohrleitungen ebenfalls ungeeignet, da der Meßabstand zwischen Laser und Detektor bei den handelsüblichen Geräten klein bleiben muß. Für die vorgegebene Aufgabenstellung hat sich das Drei-Wellenlängen-Extinktionsmeßgerät, das am Institut für thermische Strömungsmaschinen (ITS) der Universität Karlsruhe entwickelt wurde [3; 4; 5], als zweckmäßig erwiesen. Das inzwischen kommerziell verfügbare Meßgerät wurde an industrielle Bedingungen angepaßt und u. a. an einer Gaswaschanlage im Pilotmaßstab für verschiedene Aerosole getestet.

2 Meßprinzip

Das Prinzip des Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahrens beruht auf der Extinktion eines monochromatischen Lichtstrahls der Wellenlänge λ beim Durchgang durch ein Partikelkollektiv. Die Ausgangsintensität I_0 wird dabei durch Absorption und Streuung, die sich wiederum aus Brechung, Beugung und Reflexion zusammensetzt, auf die Intensität I abgeschwächt. Unter der Annahme kugelförmiger Partikel mit dem Radius r und bei Vernachlässigung von Mehrfachstreuungen gilt zwischen I und I_0 nach dem Gesetz von Lambert-Beer [5]:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-N \cdot L \cdot \int_0^{\infty} p(r) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) dr\right) \quad (1)$$

mit der Partikeldichte N , der Meßlänge L , dem Extinktionskoeffizient Q_{ext} , dem komplexen Brechungsindex $m = n + ik$ und der Partikelgrößenverteilung $p(r)$. Neben der Partikelgröße ist in dieser Gleichung auch die Anzahlkonzentration unbekannt. Durch Division der logarithmierten Intensitätsverhältnisse zweier Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen kürzt sich diese jedoch heraus. Man erhält das Extinktionsverhältnis (DQ). Hat man drei unterschiedliche Wellenlängen zur Verfügung, so kann man zwei voneinander unabhängige Extinktionsverhältnisse, auch Dispersionskoeffizienten genannt, DQ_1 und DQ_2 bilden:

$$DQ_{1,2} = \frac{\int_0^{\infty} p(r) \cdot r^2 \cdot Q_{\text{ext}}(r, \lambda_{1,2}, m) dr}{\int_0^{\infty} p(r) \cdot r^2 \cdot Q_{\text{ext}}(r, \lambda_{2,3}, m) dr} \quad (2)$$

Der Extinktionskoeffizient Q_{ext} kann für kugelförmige Partikeln mit Hilfe der Mie-Theorie [6] berechnet werden. Die Zuordnung des Partikeldurchmessers zu

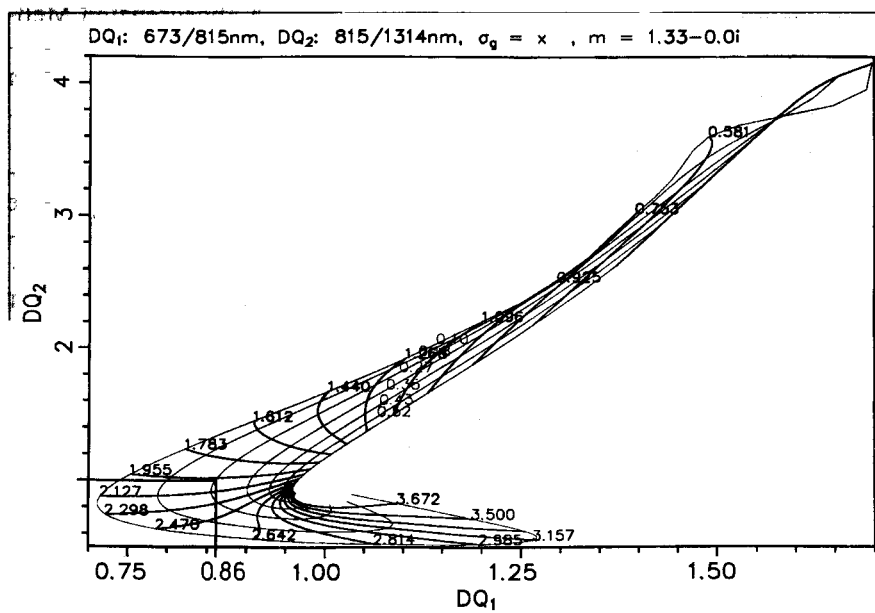
einem Extinktionsverhältnis ist bei bekanntem m und λ nach den Gln. (2, 3) nur von der Partikelgrößenverteilung $p(r)$ abhängig. Ausführliche Studien von verschiedenen Autoren [5; 7; 8] haben gezeigt, daß die meisten Aerosole, die aus einer einzigen Quelle kommen, in guter Näherung logarithmisch normalverteilt sind. Dies konnte auch durch eigene Untersuchungen bestätigt werden. Für eine logarithmische Normalverteilung um den mittleren Teilchenradius r_g gilt mit der Standardabweichung σ :

$$p(r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot r} \exp\left(-\frac{(\ln(r) - \ln(r_g))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

Setzt man Gl. (4) in die Gln. (2) ein, so erhält man zwei Gleichungen für die vier Unbekannten r_g , n , k und σ . Man kann also den mittleren Teilchenradius r_g und eine weitere sekundäre Teilcheneigenschaft, z. B. σ , berechnen, wenn man zwei andere Größen, z. B. n und k , kennt. Die Partikeldichte N ergibt sich dann aus Gl. (1). Angaben über den komplexen Brechungsindex der meisten Aerosole erhält man aus physikalischen Tabellenwerken [9; 10]. Die Bestimmung der Standardabweichung σ des Aerosols ist im allgemeinen schwieriger. Hier können beispielsweise unterstützende Messungen – mit einem Kaskadenimpaktor – helfen. Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurde meistens die Standardabweichung offengelassen und der komplexe Brechungsindex fest vorgegeben.

Ein Beispiel für eine Messung mit dem Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren ist in Bild 1 gegeben. Zur graphischen Veranschaulichung wird die Teilchengröße (dicke Linien) und die gesuchte sekundäre Eigenschaft (dünne Linien) – hier die Standardabweichung σ – in Form von Kurvenscharen als Funktion der Meßgrößen DQ_1 und DQ_2 dargestellt. Bei den Messungen wurde mit den Laserwellenlängen $\lambda_1 = 673$ nm, $\lambda_2 = 815$ nm und $\lambda_3 = 1300$ nm gearbeitet. Dem Meßwertepaar $DQ_1 = 0,86$ und $DQ_2 = 1,03$ wird unter der Annahme eines Brechungsindex-Realteils von 1,33 und eines Imaginärteils von 0 – wie es z. B. für Wasser-Aerosole der Fall ist – ein Durchmesser von 1,96 und eine Standardabweichung der log. Normalverteilung von 0,27 zugeordnet. Eine ausführliche Studie über die Auswirkung systematischer und statistischer Fehler – wie z. B. ungenügende Kenntnis der sekundären Partikeleigenschaften, statistisches Detektorrauschen etc. – auf das Meßergebnis findet man in [5]. Je weiter die Kurvenschar für eine konstante Partikeleigenschaft aufgefächert ist, desto genauer ist auch die Zuordnung bei geringfügig fehlerbehafteter Intensitätsmessung. Auf den Partikelformeinfluß soll in Abschnitt 4, auf den Einfluß eventuell

Bild 1: Partikeldurchmesser und Standardabweichung als Funktion zweier Extinktionsverhältnisse.



verschmutzter Fenster in Abschnitt 3 näher eingegangen werden.

Das beschriebene Verfahren mißt Teilchen, deren Durchmesser im Mie-Bereich der Lichtstreuung liegt, nämlich zwischen $0,1 \leq \pi d/\lambda \leq 10$, was einem Größenbereich von ca. 50 nm bis 3 µm entspricht.

3 Aufbau und Einsatz des Verfahrens

Bild 2 zeigt den optischen Aufbau und die Meßdatenerfassung des Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahrens. Die Lichtstrahlen der Laserdioden werden durch Spiegel und Strahlteiler in der Sendeeinheit zu einem Strahl überlagert und mit Glasfaserkabeln zu den drei einsetzbaren Meßstellen transportiert. Neben der Intensität des transmittierten Lichts wird auch die Laserausgangsintensität I_0 vor dem Eintritt in das Meßvolumen mit Photodioden gemessen. Damit ist eine Kompensation von Langzeitdrifts der Laser möglich. Die analogen Meßsignale der Photodioden werden mit Hilfe einer A/D-Wandlerkarte digitalisiert und an einen PC zur Auswertung übergeben. Vor jeder Messung muß eine Faktorenmessung – ohne Aerosol – durchgeführt werden. Mit ihr bestimmt man die Abschwächungen der einzelnen Wellenlängen durch die Luft und die Meßfenster. Danach kann die eigentliche Messung beginnen. Die vorhandene Software erlaubt eine On-line-Auswertung der Signale, so daß Partikelgrößen und Konzentrationen während der Messung auf dem Bildschirm des Rechners verfügbar sind.

Eine wichtige Voraussetzung für eine einwandfreie Messung ist die Sauberkeit der Meßfenster, die aus Quarzglas bestehen sollten. Durch eine Änderung des Intensitätsverhältnisses I/I_0 ohne Aerosol während der Teilchenmessung – z. B. durch Fensterverschmutzung hervorgerufen – können sehr große Meßfehler auftreten [5]. Das bedeutet, daß der konstruktiven Gestaltung der Fensterflansche eine große Bedeutung zu-

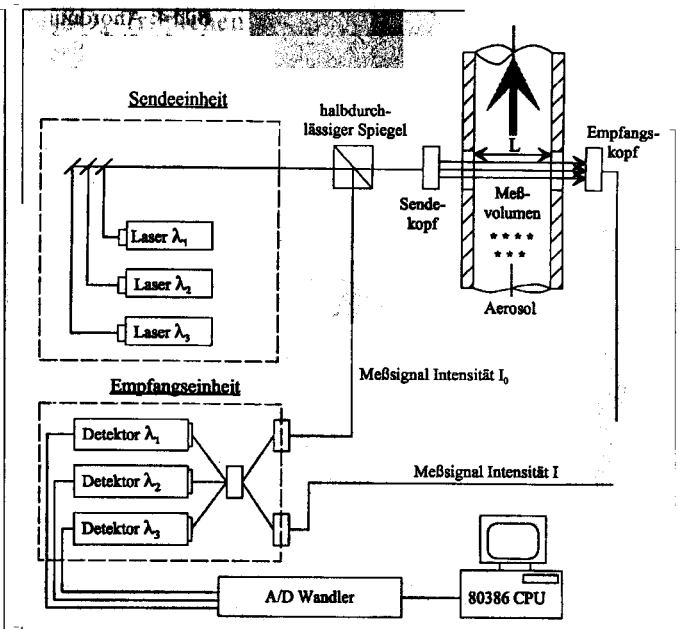
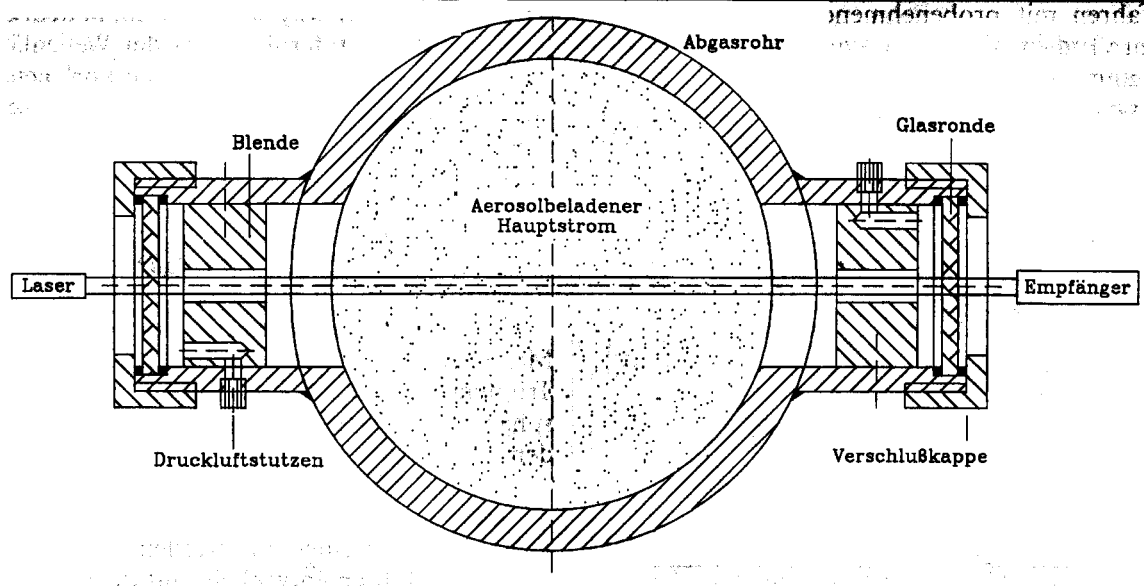


Bild 2: Aufbau des Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahrens.

kommt. Eine Möglichkeit, der Verschmutzung vorzubeugen, ist die Verwendung von Druckluft wie in Bild 3 gezeigt. Die Druckluft strömt durch die angeschweißten Stutzen zum Fenster hin und durch eine Blende mit einer engen Bohrung – Durchmesser ca. 6 mm – in den aerosolbeladenen Hauptstrom. Auf diese Weise kann ein Partikeltransport zur Fensteroberfläche vermieden werden. Außerdem reduzieren die Blenden den Winkel, aus dem Streulicht aus dem Meßvolumen in die Detektoren gelangen kann. Wenn man dafür sorgt, daß die Innenseite der Blende mit der Innenseite des Abgasrohres zusammenfällt, so wird der Fehler durch Messung von Partikeln im Totraum des Meßstutzens ausgeschlossen. Bei den in diesem Beitrag vorgestellten Messungen wurde mit einem Spülluftstrom von 1 m³/h pro Meßstelle gearbeitet. Bei einem Hauptstrom von

Bild 3: Konstruktive Ausführung einer In-situ-Meßstelle.



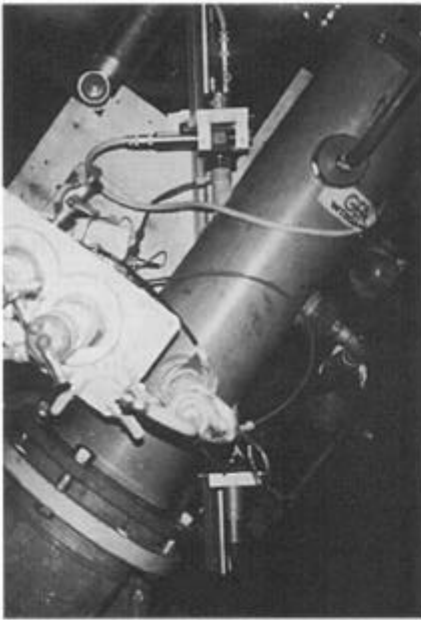


Bild 4: Anordnung der Meßköpfe am Abgasrohr.

mehreren $100 \text{ m}^3/\text{h}$ tritt dadurch sicherlich kein merklicher Fehler auf. Außer der hier vorgestellten Möglichkeit des Druckluftensatzes besteht auch die Möglichkeit der Beheizung der Gläser auf eine Temperatur, die über der Verdampfungstemperatur der Aerosole liegt, so daß die niedergeschlagenen Teilchen sofort wieder verdampfen. Bild 4 zeigt eine mögliche Anordnung der Meßköpfe und -stutzen. Die Meßstutzen können auch unter einem bestimmten Winkel an das Abgasrohr angeschweißt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Meßlänge zu vergrößern.

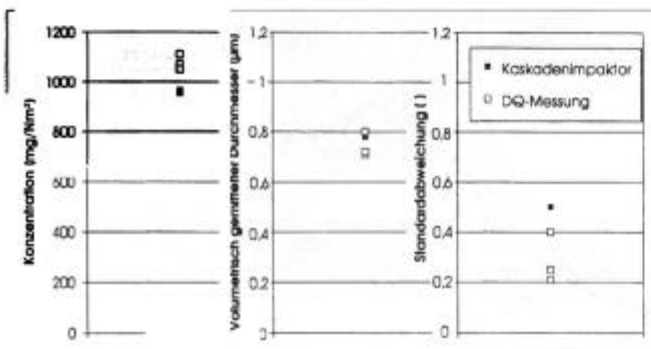
Es soll hier nochmals betont werden, daß das besprochene Verfahren keine Kalibrierung mit Partikeln bekannter Größe und Konzentration erfordert. Die im folgenden Abschnitt aufgeführten Messungen dienen nur als Nachweis für die Zuverlässigkeit des Systems.

4 Messungen

Im folgenden wird das oben beschriebene optische Meßverfahren mit probenehmenden, abscheidenden Verfahren verglichen.

Zu Beginn der Versuche wurden mehrere Messungen mit Latex-Suspensionen und mit Testaerosolen durch-

Bild 5: Vergleich von Extinktions- und Kaskadenimpaktormessung von Ölnebel.



geführt. Bild 5 zeigt ein Ergebnis der Messungen mit Ölnebel aus einem handelsüblichen Aerosolgenerator. Die Öltröpfchen passierten dabei zuerst eine optische Meßstelle zur Extinktionsmessung, ehe sie einem Kaskadenimpaktor zugeführt wurden. Die probenehmenden Messungen wurden nach DIN 2066 durchgeführt. Die Öltröpfchen sind für derartige Vergleichsmessungen ideal, da sie einerseits kugelförmig sind und außerdem einen vernachlässigbaren Dampfdruck besitzen, so daß sie ihre Größe nicht durch Verdampfung bzw. Kondensation verändern können. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung bei den ermittelten Konzentrationen und volumetrisch gemittelten Teilchendurchmessern; selbst die dritte Meßgröße – hier die Standardabweichung des Partikelkollektivs – konnte in diesem Fall zufriedenstellend gemessen werden.

In einem weiteren Versuch wurden sehr feine Tropfen einer wässrigen Na_2SO_4 -Lösung mit einem Massenanteil von ca. 10% Na_2SO_4 mittels einer Hochdruckeinstoffdüse erzeugt. Die optische und die abscheidende Messung dieser Teilchen [11] erfolgten nach einem Tropfenabscheider, der die größeren Tropfen herausfilterte. Bild 6 zeigt das Ergebnis. Die Abweichungen der beiden Meßverfahren sind auch in diesem Fall klein, höchstens 30%. Vergleicht man die Partikelkonzentrationen, so ist die Übereinstimmung ähnlich. Die Unterschiede sind bedingt durch eine mögliche Durchmesser- und damit Massenänderung der Aerosole während der isokinetischen Teilstromentnahme, absolut isotherme Bedingungen sind dabei in der Regel nicht zu verwirklichen.

Waren die Ölnebeltröpfchen aus Bild 5 – mit einer Größe von $0,7 \mu\text{m}$ – ungefähr in der Mitte des Meßbereichs der Drei-Wellenlängen-Extinktionsmeßtechnik, so liegen die volumetrisch gemittelten Durchmesser der Wassertröpfchen aus Bild 6 mit einem Durchmesser von $3 \mu\text{m}$ schon sehr nahe am Bereich der geometrischen Optik, in dem die Streulichtintensität durch die Projektionsfläche der Teilchen bestimmt wird und unabhängig ist von der verwendeten Wellenlänge, so daß eine Größenbestimmung mit der Extinktionsmeßtechnik unmöglich wird. Die untere Grenze des Meßbereichs bildet der Rayleigh-Bereich, in dem die Streulichtintensität mit der 4. Potenz der Wellenlänge fällt. Um in die Nähe dieses Bereichs zu kommen, wurden feste NH_4Cl -Aerosole generiert und gemessen. Dabei wurden Teilchendurchmesser bis hinab zu 200 nm , mit einer zufriedenstellenden Auflösung der Standardabweichung als dritter Parameter, ermittelt. Vergleichsmessungen mit dem Kaskadenimpaktor sind nicht möglich, da die Trenngrenze der kleinsten Stufe des Impaktors bei ca. $0,3 \mu\text{m}$ liegt.

Die Extinktionsmeßtechnik wurde anschließend zur Messung von Säureaerosolen (HCl - und H_2SO_4 -Tröpfchen) in einer wasserdampfgesättigten Atmosphäre eingesetzt. Hier ist eine Kontrollmessung mit dem Impaktor nicht möglich, da die Tröpfchen keine feste Substanz enthalten. Auch jede andere Meßtechnik kann hier – wie oben angedeutet – nur mit großen Schwierigkeiten eingesetzt werden. Es wurde deshalb ein Meßverfahren entwickelt, mit dem auf naßchemi-

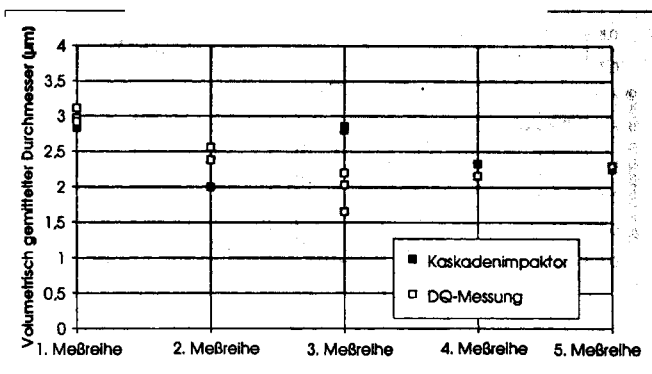


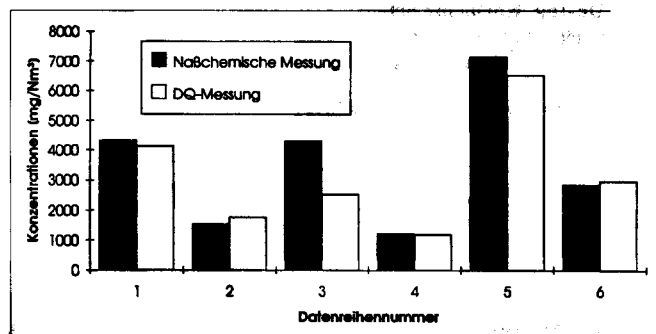
Bild 6: Vergleich der Extinktions- und Kaskadenimpaktormessung von Na_2SO_4 -Tröpfchen.

schem Weg wenigstens die Konzentration der Aerosole ermittelt und mit den optischen Ergebnissen verglichen werden kann. Da die Berechnung der Konzentration beim optischen Verfahren auf die Partikelgrößenbestimmung aufbaut (vgl. Gl. (1)), kann man davon ausgehen, daß der Fehler bei der Teilchengröße eher kleiner ist.

Bei dem benutzten Meßverfahren werden Impingerflaschen, die zur naßchemischen Messung benötigt werden, mit Phthalsäureester gefüllt. Diese Substanz, die nur eine geringe Löslichkeit von H_2O aufweist, sättigt man vor dem Versuch mit Wasser, so daß sie während der Messung kein dampfförmiges Wasser aus dem abgezogenen Gas mehr aufnehmen kann. Der Teilstrom des Aerosols wird dann durch drei hintereinandergeschaltete Flaschen gezogen, wobei die Tropfen infolge ihrer Trägheit abgeschieden werden. Dabei ist auf eine isotherme Probenahme zu achten, um die Teilchenkonzentration nicht durch Kondensation oder Verdampfung zu verändern. Die Probe spült man anschließend mit Acetonitril. Diese Substanz sorgt dafür, daß sich das Wasser im Ester auflöst. Die Probe ist dann einer chemischen Analyse zur Wasser- und Säurebestimmung zugänglich.

Bild 7 zeigt einen Vergleich der Konzentrationen, die sowohl auf naßchemischem als auch auf optischem Weg ermittelt wurden. Auch hier ist die Übereinstimmung der prinzipiell verschiedenen Meßverfahren erstaunlich gut. Der Ausreißer in der dritten Messung kann durch Nichteinhaltung der isothermen Absaugung bedingt sein. Die gemessenen Teilchendurchmesser der Aerosole lagen zwischen $0,5$ und $1 \mu\text{m}$ bei

Bild 7: Vergleich der Extinktions- und naßchemischer Messung von Säureaerosolen (HCl - und H_2SO_4 -Tröpfchen).



H_2SO_4 -Tröpfchen und bei $1-3 \mu\text{m}$ im Fall der HCl -Aerosole.

Im Rahmen der Untersuchungen über die Zuverlässigkeit des Meßverfahrens wurden auch Versuche mit Siliziumstaub durchgeführt. Diese Teilchen sind keine Kugeln, sondern eher quader- bzw. zylinderförmig, so daß das Meßverfahren streng genommen hier nicht eingesetzt werden darf. Es soll nun gezeigt werden, wie sich ein derartiger Formeinfluß der Teilchen auf das Meßergebnis der Teilchengröße und -konzentration auswirkt.

Im Falle kugelförmiger Partikeln ist ein Vergleich der Teilchengrößen, die mit dem optischen Verfahren bzw. dem Kaskadenimpaktor ermittelt wurden, relativ einfach. Bei unregelmäßig geformten Aerosolen muß man sich die Frage stellen: Welchen Durchmesser bestimmen die unterschiedlichen Verfahren?

Der Kaskadenimpaktor mißt den aerodynamischen Durchmesser, also den Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 g/cm^3 , die dieselbe Sinkgeschwindigkeit hat wie das unregelmäßig geformte Teilchen. Die Masse der Partikeln ist also von entscheidendem Einfluß auf die Durchmesserbestimmung. Beim Extinktionsverfahren – dem die Mie-Theorie für Kugeln zugrunde liegt – wird im Falle unregelmäßiger Körper der Durchmesser einer Kugel bestimmt, der dieselbe Extinktion besitzt wie das betrachtete Teilchen.

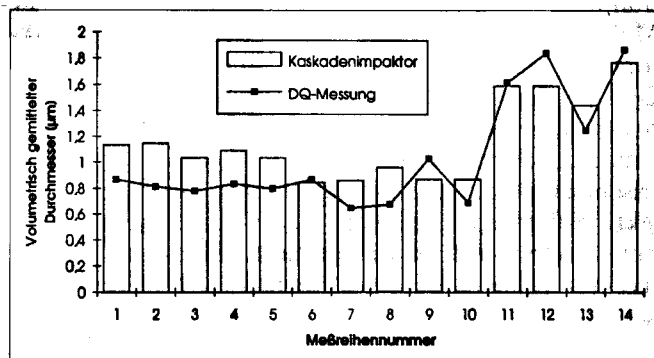


Bild 8: Vergleich der gemessenen Partikelgrößen für SiO_2 -Staub.

Unter der Annahme zylinderförmiger Partikeln mit dem Durchmesser d und der Länge l – wie sie im Fall des Quarzstaubs näherungsweise vorhanden sind – kann man folgende Aussagen machen:

1. Der aerodynamische Durchmesser eines Zylinders ist bei $l/d > 1$ immer größer als der Durchmesser des Zylinders. Der Unterschied hängt von der Größe von l/d ab.
2. Theoretische Untersuchungen [5] über den Extinktionsverlauf von Zylindern mit $l/d > 4$ haben gezeigt, daß der Durchmesser, der unter der Annahme kugelförmiger Partikeln bestimmt wird, größer ist als der Durchmesser des Zylinders. Die Abweichungen können bei kleinen Teilchendurchmessern u. U. sehr groß werden.

Man sieht also, daß beim Vergleich der Durchmesser Vorsicht geboten ist, wieweil beide Effekte gegen-

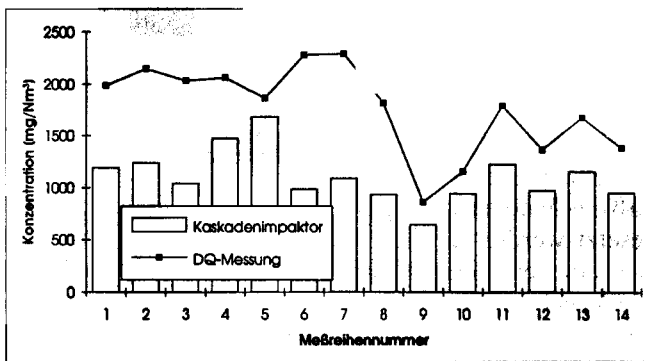


Bild 9: Vergleich der gemessenen Konzentrationen für SiO₂-Staub.

läufig sind und sich aufheben können. Einen Vergleich der Größenmessungen mit den beiden Verfahren für die SiO₂-Aerosole bringt Bild 8. Dabei wurde ein komplexer Brechungsindex von $m = 1,46 + 0i$ verwendet [9].

Das optische Meßverfahren kann man also durchaus zur Partikelgrößenbestimmung auch von unregelmäßigen Teilchen einsetzen; man muß allerdings bei der Interpretation der Ergebnisse vorsichtig sein. Beim Vergleich der ermittelten Massenkonzentrationen liegen die Verhältnisse anders. Hier bestehen keine Definitionsprobleme wie bei der Größenbestimmung. Der Kaskadenimpaktor mißt die tatsächliche Konzentration in mg/Nm³. Die Konzentration, die das optische Meßverfahren liefert, liegt immer über der des Impaktors (vgl. Bild 9). Für den Bereich der geometrischen Optik – dem die vorhandenen Staubpartikeln schon relativ nahe kommen – kann diese Abweichung relativ einfach nachvollzogen werden. Im Bereich der geometrischen Optik ist die Extinktion proportional der Projektionsfläche der Teilchen. Das Volumen von Kugeln mit derselben Extinktion wie die zylinderförmiger Partikeln ist größer als das der Partikeln selbst. Der Fehler in der Konzentrationsbestimmung steigt mit zunehmendem l/d streng monoton an. Bei einem l/d von 2 beträgt die Abweichung 15%; bei $l/d = 3$ 20% und bei $l/d = 4$ ca. 30%. Die gemessenen SiO₂-Teilchen haben im Mittel ein l/d -Verhältnis von ca. 2,5, so daß die Abweichung in Bild 9 verständlich wird.

Aus Bild 10 wird deutlich, daß bei einer genügend großen Auffächerung der Kurvenschar in der DQ_1 - DQ_2 -Ebene für eine konstante Sekundäreigenschaft des Kollektivs diese Eigenschaft – hier die Standardabweichung – mit einer hinreichenden Genauigkeit ermittelt werden kann. Derartig große Auffächerungen sind bei einem Brechungsindex von $1,33 + 0i$ für Wasser in einem Größenbereich von 0,5 bis 2,5 µm gegeben. Darunter und darüber ist keine sinnvolle Auflösung der Standardabweichung mehr möglich.

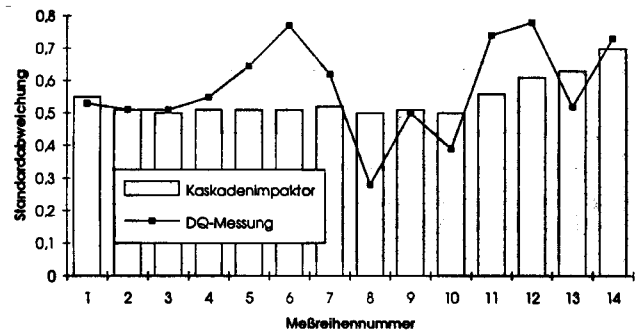


Bild 10: Vergleich der gemessenen Standardabweichungen für SiO₂-Staub.

Literatur

- [1] Schaber, K.: Aerosolbildung bei der Absorption und Partialkondensation. Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990), S. 793–804.
- [2] Palas GmbH Partikel- und Lasermeßtechnik: Firmenprospekt PCS-2000 (1992).
- [3] Dittmann, R., Feld, H.-J., Samenfink, W. und Wittig, S.: Multiple Wavelength Extinction Technique for Particle Characterization in Dense Particle Clouds. 5th European Symposium Particle Characterization, Preprints 2, S. 507–518 (1992).
- [4] Wittig, S., Feld, H.-J., Müller, A., Samenfink, W. und Tremmel, A.: Application of the Dispersion-Quotient-Method under Technical System Conditions. Proc. 2nd International Congress on Optical Particle Sizing, S. 335–347 (1990).
- [5] Tremmel, A.: Elektronenstrahlinduzierte Partikelbildung in Abgasen von Feuerungsanlagen: Einsatz eines optischen In-situ Meßverfahrens. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe (1993).
- [6] Mie, G.: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Annalen der Physik 25 (1908), S. 377–445.
- [7] Hinds, W.: Aerosol Technology. John Wiley & Sons, New York (1982).
- [8] Friedlander, S.K.: Smoke, Dust and Haze. John Wiley & Sons, New York (1977).
- [9] Landolt, H. und Boernstein, R.: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. Springer Verlag, Berlin (1951).
- [10] CRC Handbook: Handbook of chemistry and physics. The chemical rubber company, Cleveland (1972).
- [11] Bürkholz, A.: Meßmethoden zur Tropfengrößenbestimmung. Chem.-Ing.-Tech. 45 (1973), S. 1–7.

Die Autoren danken der Fa. GEA Wiegand GmbH, Ettlingen, für die Ermöglichung der Messungen und dem Institut für thermische Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) für die Zusammenarbeit bei der Erprobung des Meßverfahrens.

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schaber und Dipl.-Ing. Andreas Schenkel, Universität Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik, D-70511 Stuttgart.

Prof. Dr.-Ing. Richard A. Zahoransky, D-79674 Todtnau.