

Cercl'Air Empfehlung Nr. 28

Messung der Partikelanzahlkonzentration und –grössenverteilung

Die neue technische Spezifikation CEN/TS 16976:2016-11, «Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols» ist der vorliegenden Cercl'Air Empfehlung Nr. 28 übergeordnet. Da die Cercl'Air Empfehlung Nr. 28 aber inhaltlich umfassender als die CEN/TS 16976 ist, wird die Cercl'Air Empfehlung Nr. 28 nicht ausser Kraft gesetzt.

Fachgruppe Partikelzählung
2007 - 2010

Jürg Schlatter (METAS)
Frank Arens (AFU SG)
Peter Böhler (inNET)
Jürg Brunner (UGZ Zürich)
Roy Eugster (AWEL)
Christoph Hüglin (EMPA)
Raffael Känzig (inNET)
Ernest Weingartner (PSI)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Motivation	3
1.2	Geltungsbereich / Anwendungsbereich.....	3
1.3	Gesetzliche Grundlagen	4
1.4	Abkürzungen	4
1.5	Begriffe	4
1.6	Variablen	4
2	Grundsätze der Partikelmessung	5
2.1	Anwendungsgebiete und Planung einer Partikelmessung	5
2.2	Messgrößen	6
2.3	Modifikation des Aerosols.....	7
2.4	Messverfahren.....	9
2.5	Artefakte bei der Messung von Partikeln.....	12
2.6	Darstellung von Partikelanzahl-Größenverteilungen.....	15
3	Probenahme	16
3.1	Materialien der Probenahme	16
3.2	Ansaugen der Probeluft.....	16
3.3	Vorabscheider	17
3.4	Diffusions-, Sedimentations- und Impaktionsverluste.....	17
3.5	Verdünnung	19
3.6	Trocknen des Aerosols.....	20
3.7	Thermische Behandlung des Aerosols.....	20
3.8	Verwendung von Puffervolumen	21
3.9	Flussteiler (Flow Splitting)	21
3.10	Spezifische Besonderheiten bei Emissionsmessungen an Industrie- und Gewerbeanlagen	22
4	Qualitätssicherung.....	24
4.1	Zweck der Qualitätssicherung	24
4.2	Flusskontrolle	24
4.3	Leckprüfung.....	24
4.4	Wartung und Justierungen	25
4.5	Datenauswertung und Dokumentation	25
4.6	Kalibrierung	25
	Anhang 1: Beispiele von Aerosolarten und -quellen.....	27
	Anhang 2: Übersicht über Messverfahren.....	29
	Anhang 3: Messgrößen für den Durchmesser von Partikeln	31
	Anhang 4: Hinweise zum Betrieb ausgewählter Messverfahren	32
	Anhang 5: Auswertung von Größenverteilungsdaten	39
	Bibliographie.....	42

Messung der Partikelanzahlkonzentration und –größenverteilung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Messung der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelanzahlgrößenverteilung ist komplex. Viele Messaufgaben sind einmalig und erfordern einen spezifischen Messaufbau und ein spezifisches Messkonzept. Die vorliegende Empfehlung beschreibt nicht sämtliche Anwendungen im Einzelnen, sondern beschränkt sich auf eine beispielhafte Beschreibung von Messaufbauten zur Messung von Partikelgrößen im Submikrometerbereich. Sie weist anhand dieser Anwendungen auf mögliche Fehlerquellen hin.

Der Hauptteil behandelt die Partikelmessung auf grundsätzliche Weise. In den Anhängen werden die Grundlagen auf verschiedene Messmethoden angewandt und konkretisiert.

Nach den Definitionen der Messgrößen für die Partikelmessung werden die Modifikation des Aerosols, die verschiedenen Messverfahren und mögliche Artefakte der Messung erläutert. Die Probenahme wird in einem eigenen Abschnitt zusammen mit praktischen Hinweisen diskutiert, da sie oft weder von Messgeräteherstellern noch von Auftraggebern vorgegeben wird. In den Anhängen werden verschiedene Messverfahren vorgestellt und auf typische Problemkreise hingewiesen.

Die Validierung des Messaufbaus, das Auffinden von Fehlerquellen und deren Quantifizierung, bleibt eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Sie geht der eigentlichen Messung voran, begleitet sie und muss bei der Auswertung wieder aufgenommen werden. Diese Empfehlung liefert die notwendigen Elemente dazu.

1.2 Geltungsbereich / Anwendungsbereich

Diese Empfehlung liefert die technischen Grundlagen für die Durchführung von Messungen der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelgrößenverteilung in den Bereichen Emissionen (z.B. Verbrennungsprozesse), Aussenluftmessungen, sowie von Messungen an Arbeitsplätzen und Innenräumen.

Die Empfehlung bietet eine Handlungsanweisung für klar umschriebene Messaufgaben. In diesen Fällen ermöglicht die Vereinheitlichung der Messverfahren die Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Für andere Messaufgaben kann diese Empfehlung Hinweise geben, wo kritische Punkte beachtet werden müssen.

Die Begriffe Feinstaub und Schwebstaub werden oft zur Bezeichnung von luftgetragenen Partikeln in der Aussenluft verwendet. Beide Begriffe sind nicht klar definiert. Häufig wird die Massenkonzentration aller luftgetragenen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer (PM10) als Feinstaub bezeichnet, mit Schwebstaub ist häufig die Massenkonzentration aller luftgetragenen Partikel gemeint. Die Bestimmung von Massenkonzentrationen (z.B. PM10-Bestimmung) wird in dieser Empfehlung nicht behandelt.

1.3 Gesetzliche Grundlagen

Die Luftreinhalteverordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV), SR 814.318.142.1 definiert einen Grenzwert für die Partikelmassenkonzentration (Feinstaub PM10), welche mittels Referenzmethode (Gravimetrie) oder einer gleichwertigen Methode erfasst wird (EN 12341 oder EN 14907).

Für die Partikelanzahlkonzentration und die Partikelanzahl-Grössenverteilung (Partikelgrössenverteilung) gibt es derzeit folgende gesetzlichen Vorschriften:

- Abgasvorschriften für Personenfahrzeuge: ECE R83
- LRV Artikel 3 mit Anhang 4, Artikel 14: Anforderungen an Baumaschinen und deren Partikelfiltersysteme

1.4 Abkürzungen

AE	Aerosol Elektrometer
CPC	Condensation Particle Counter: Kondensationskernzähler
DMA	Differential Mobility Analyzer: Differentieller Beweglichkeitsanalysator
OPC	Optical Particle Counter: Optisches Partikelmessgerät, in der Regel ein Streulichtmessgerät
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer: Messgerät für die Partikelanzahl-Grössenverteilung und berechneter Partikelanzahlkonzentration
OC	Organischer Kohlenstoff: organische partikelgebundene Substanzen (teilweise flüchtig)

1.5 Begriffe

Modus	Partikelgrösse mit der maximalen Anzahlkonzentration
Median	Zentralwert der Stichprobe, hier die Partikelgrösse der Anzahlgrössenverteilung, bei welcher die halbe Anzahl der Partikel kleiner und die halbe Anzahl grösser sind
Partikelanalysator	Partikelmessgerät zur Bestimmung von Anzahlgrössenverteilungen
Partikelzähler	Partikelmessgerät zur Bestimmung von Anzahlkonzentrationen
Ultrafeinpartikel	Partikelfraktion der Partikel mit einem Durchmesser $d < 0.1 \mu\text{m} = 10^{-7} \text{m}$ (ultrafine particle, nanoparticle)
Feinpartikel	Fraktion der Partikel mit einem Durchmesser $0.1 \mu\text{m} < d < 2.5 \mu\text{m}$ (fine particle)
Grobpartikel	Fraktion der Partikel mit einem Durchmesser $d > 2.5 \mu\text{m}$ (coarse particle)

1.6 Variablen

d	Partikeldurchmesser (nm). Der Partikeldurchmesser ist nicht ein eindeutiges Mass und hängt vom Anwendungsbereich und von der Messtechnik ab (Siehe Anhang 3)
C	Anzahlkonzentration (Anzahl Partikel pro Volumeneinheit: cm^{-3})
$dC(d)/d \log(d)$	Differentielle Partikelanzahlkonzentration (Anzahl Partikel pro Volumeneinheit: cm^{-3}) (oft auch $dN(d)/d \log(d)$)
$F(d)$	Kumulative Partikelanzahlkonzentration bezeichnet die Partikelanzahlkonzentration aller Partikel, welche kleiner als den Grenzwert d sind (Anzahl Partikel pro Volumeneinheit: cm^{-3})

2 Grundsätze der Partikelmessung

2.1 Anwendungsgebiete und Planung einer Partikelmessung

2.1.1 Von der Aerosolquellen zu den Messmitteln

Die Messung von luftgetragenen Partikeln ist vielfältig, die ungefähren Eigenschaften des zu messenden Aerosols (z.B. Grössenbereich, chemische Zusammensetzung) sollten daher vor der Messung bekannt sein (oder abgeschätzt werden).

Eine tabellarische Übersicht über Aerosolarten und -quellen befindet sich im Anhang 1. Die Partikelanzahlkonzentration und die Grössenverteilung sind in einem Aerosol aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauer der einzelnen Fraktionen räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Bei der Wahl des Standorts von Messungen, des untersuchten Messvolumens und der Messdauer müssen diese Eigenschaften berücksichtigt werden.

Beispiel: In der Nähe einer stark befahrenen Strasse hängt die Partikelanzahlkonzentration und -grössenverteilung von der Distanz zur Strasse ab. Erstens führt die Verdünnung des frischen Aerosols mit gealtertem Aerosol zu einer Vergrösserung des mittleren Partikeldurchmessers. Zweitens verkleinert sich dadurch auch die Anzahlkonzentration mit zunehmender Distanz.

Wie in der Tabelle in Anhang 2 ersichtlich ist, unterscheiden sich die Messmethoden bezüglich des Partikelgrössenbereichs, welcher abgedeckt werden kann. Durch die Kombination von unterschiedlichen oder gleichen Messverfahren in unterschiedlicher Konfiguration kann eine bessere Abdeckung des gesamten Partikelgrössenbereichs erreicht werden. Der Entscheid über das einzusetzende Messverfahren richtet sich stark nach der Fragestellung, welche die Messung beantworten soll.

Beispiel: Kombination von SMPS-Systemen mit OPC für eine breite Abdeckung der Partikelgrösse oder die Anwendung von Vorabscheidern (Impaktoren oder Zykclone) bei Partikelzählern für die Eingrenzung des analysierten Partikelgrössenbereichs und zur Verringerung der Verschmutzung der Geräte (vgl. Anhang 4.1).

2.1.2 Planung von Aerosolmessungen

Die Planung einer Messung der Partikelanzahlkonzentration und/oder Partikelgrössenverteilung orientiert sich an den folgenden Fragen. Nach deren Beantwortung werden die Anwendbarkeit der Messverfahren, die notwendige Probenaufbereitung und die zeitliche und örtliche Datenerhebung bestimmt:

- Welche Informationen sollen aus den Messungen gewonnen werden?
- Welches sind die Quellen des zu messenden Aerosols?
- Räumliche Abgrenzung: Wo, für welchen Bereich soll eine Messung gelten?
- Zeitliche Abgrenzung: Langfristige Messung oder Stichprobenmessung/Einzelversuch?
- Übertragbarkeit der Messung, und eventuell Vergleich mit existierenden Daten?

2.1.3 Ziele der Aerosolmessungen

Die Messungen von Aerosolen können folgenden Zweck umfassen:

- Lokalisierung von Quellen für Aerosole
- Bereitstellen einer Datengrundlage für die Langzeitentwicklung
- Bereitstellen einer Datengrundlage für epidemiologische Untersuchungen
- Vervollständigen der Datengrundlage für die Beurteilung der Luftqualität

2.2 Messgrössen

Bei Messungen der Partikelanzahlkonzentration und -grössenverteilung müssen die Messbereiche (Grössenbereich, Konzentrationsbereich, Zusammensetzung, etc.) und Messbedingungen für die jeweilige Messaufgabe zugeschnitten sein und dokumentiert werden.

2.2.1 *Bezugswerte für die Partikelanzahl-Grössenverteilung und -Konzentration*

Die Messwerte werden bei Immissionsmessungen in der Regel auf die aktuellen Werte der Temperatur, des Luftdrucks bezogen.

Die Messwerte bei Emissionsmessungen werden üblicherweise nicht nur auf 273,15 K und 1013 hPa normiert, sondern auch auf ein trockenes Abgasvolumen bezogen.

In beiden Fällen ist zu beachten, dass die im Gerät erfassten Werte von den Umgebungswerten abweichen können.

Beispiel: Die Massendurchflussmessung wird auf Referenzbedingungen bezogen. Neben 0 °C und 1013 hPa werden die Ergebnisse oft für 20 °C angegeben. Dadurch können Abweichungen um 5 % bis 10 % entstehen.

2.2.2 *Messgrössen für Partikeldurchmesser*

Aerosolpartikel sind in der Regel nicht kugelförmig sondern weisen uneinheitliche und vielfältige Formen auf. Es ist deswegen kaum möglich die Grösse von Aerosolpartikeln durch einen geometrischen Durchmesser zu charakterisieren (siehe Anhang 3). Die Veranschaulichung von Partikeln als Kugeln stellt also eine sehr grobe Vereinfachung dar. Als Mass für die Grösse von Aerosolpartikeln wird dennoch häufig der so genannte Äquivalentdurchmesser verwendet (Baron und Willeke, 2001). Dieser ist definiert als Durchmesser eines kugelförmigen Partikels, das beim eingesetzten Messverfahren das gleiche Ergebnis liefert, wie das untersuchte Aerosolpartikel. Verschiedene Äquivalenzdurchmesser sind nicht gleichwertig und können oft nicht ineinander umgerechnet werden (vgl. Anhang 3).

Partikelanalytoren erfassen verschiedene Grösseneigenschaften der Partikel:

- **Beweglichkeitsdurchmesser:** Die Beweglichkeit der Partikel ist eine Mass für die Diffusionsgeschwindigkeit. Sie wird bei der Messung von ultrafeinen Partikeln eingesetzt.
- **Aerodynamischer Durchmesser:** Der aerodynamische Durchmesser eines Partikels beschreibt sein Trägheitsverhalten und ist für die Impaktion von Bedeutung.
- **Optischer Durchmesser:** Der optische Durchmesser eines Partikels ist definiert durch das Vermögen eines Partikels Licht zu streuen. Dieser Durchmesser hängt deshalb stark vom Brechungsindex (und der Form) des Partikels und nicht allein von seiner geometrischen Grösse ab.

2.2.3 *Messbereich der Partikelanzahl-Grössenverteilung und -Konzentration*

Der Messbereich der Partikelgrösse kann insbesondere bei kleinen Partikeln entscheidend sein. Oft ist der Anteil von kleinsten Partikeln sehr gross und führt zu Abweichungen zwischen Messverfahren mit unterschiedlichen Messbereichen. Dies gilt nicht nur für die Partikelgrössenverteilung sondern auch für die Partikelanzahlkonzentration.

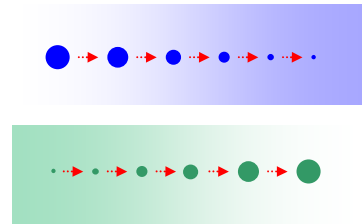
2.3 Modifikation des Aerosols

Aerosole sind nicht stabil, ihre Veränderung beginnt unmittelbar nach der Entstehung und ist nie abgeschlossen. Dies ist häufig eine Ursache von hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität bei der Messung von Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahlkonzentration.

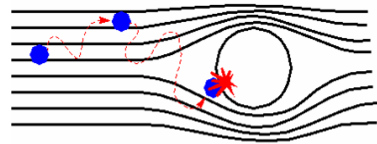
2.3.1 Prozesse der Aerosolmodifikation

Die meisten der folgenden Prozesse sind grössenabhängig. Da die Beweglichkeit von kleinen Partikeln grösser ist, sind beispielsweise die Diffusion und die elektrostatische Abscheidung für kleine Partikel wichtiger als Impaktion oder Sedimentation.

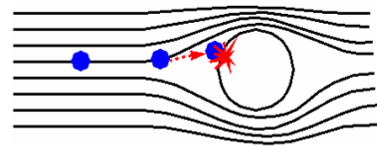
Verflüchtigung und Kondensation: Aerosolpartikel bestehen häufig aus kondensierten Verbindungen, welche im Gleichgewicht mit der Gasphase sind (z. B. halb-flüchtige organische Verbindungen oder anorganische Salze z.B. Ammoniumsalze). Temperatur- und Druckänderungen oder eine Verdünnung mit sauberer Luft können ihre Aufteilung auf Partikel- oder Gasphase ändern. Dadurch ändern sich die Grösse und auch die Zusammensetzung der Partikel.



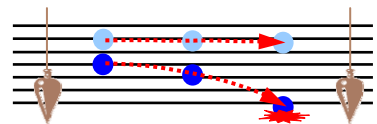
Diffusion: Die Partikel eines Aerosols folgen grundsätzlich den Stromlinien des Gases (schwarze Linien). Durch die brownische Eigenbewegung verlassen die Partikel sie aber und gelangen an die Wände des Behälters oder an Hindernisse, wo sie sich anheften.



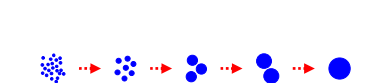
Impaktion: Die Partikel eines Aerosols folgen grundsätzlich den Stromlinien des Gases. Wenn die Partikelmasse gross ist und die Stromlinie enge Kurven aufweist, verlassen die Partikel aufgrund Ihrer Trägheit die Stromlinie und bleiben an Oberflächen haften.



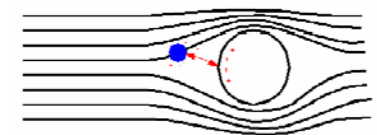
Sedimentation: Grössere Partikel (typischerweise über 1 µm Durchmesser) weisen eine merkliche Sinkgeschwindigkeit auf. Vor allem in waagrechten Leitungen muss mit Verlusten durch Sedimentation gerechnet werden.



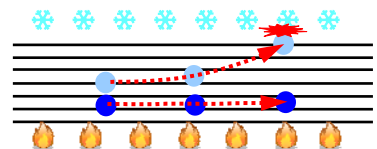
Koagulation: Aerosole mit hohen Partikelanzahlkonzentration sind bezüglich Konzentration und Partikelgrösse nicht stabil, weil bei Kollisionen die Partikel untereinander zusammenkleben. Dadurch verringert sich die Anzahl und der mittlere Durchmesser vergrössert sich.



Elektrostatische Aufladung: Nichtleitende Materialien können aufgrund von Verformungen oder auch nur Wärme Ladungsverschiebungen erfahren. An ihren Oberflächen entstehen dadurch elektrische Felder, welche geladene Partikel, die auch im "neutralen" Aerosol auftreten, richtiggehend absaugen.



Thermophorese: Partikel, welche sich in einem Temperaturgradienten befinden, bewegen sich vermehrt in Richtung tiefer Temperaturen. Dies führt zu Abscheidungen bzw. zur Entmischung.



2.3.2 Modifikation des Aerosols in der Atmosphäre

Die Quellen, Grössen und Alterungseffekte der Aerosolpartikel in der Atmosphäre sind vielfältig. Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Prozesse der Partikelentstehung und der Partikelverluste.

Die **ultrafeinen Aerosolpartikel** (mit Durchmesser $d < 0.1 \mu\text{m}$) entstehen durch photochemische Reaktionen aus Vorläufergasen (Nukleation) oder durch die primäre Emission (z.B. Verbrennungsprozesse). Oft wachsen sie durch Kondensation und Koagulation in den so genannten Akkumulationsmode ($0.1 \mu\text{m} < d < 1 \mu\text{m}$).

Die **feinen Aerosolpartikel** ($d < 2.5 \mu\text{m}$) entstehen aus ultrafeinen Partikeln, werden als Sekundärpartikel gebildet oder als primäre Aerosolpartikel emittiert (z. B. Russ, Rauch). Sie weisen eine mittlere Verweilzeit von mehreren Tagen in der Atmosphäre auf. Ein Entfernungsprozess ist die nasse Deposition, über die Interaktion mit Wolken und Ausregnen. Als Kondensationskerne und als Bestandteil von Tröpfchen (Zusammensetzung, Tröpfchengrösse, Wolkenhäufigkeit) haben Partikel verschiedene Einflüsse auf die Wolken.

Die Partikel der **groben Fraktion** ($d > 2.5 \mu\text{m}$) bestehen zu einem grossen Teil aus mechanischem Abrieb und aus Wasserkondensaten (Nebel, Dunst, Wolken, Regen). Die grobe Fraktion wird durch Sedimentation effizient aus der Luft entfernt.

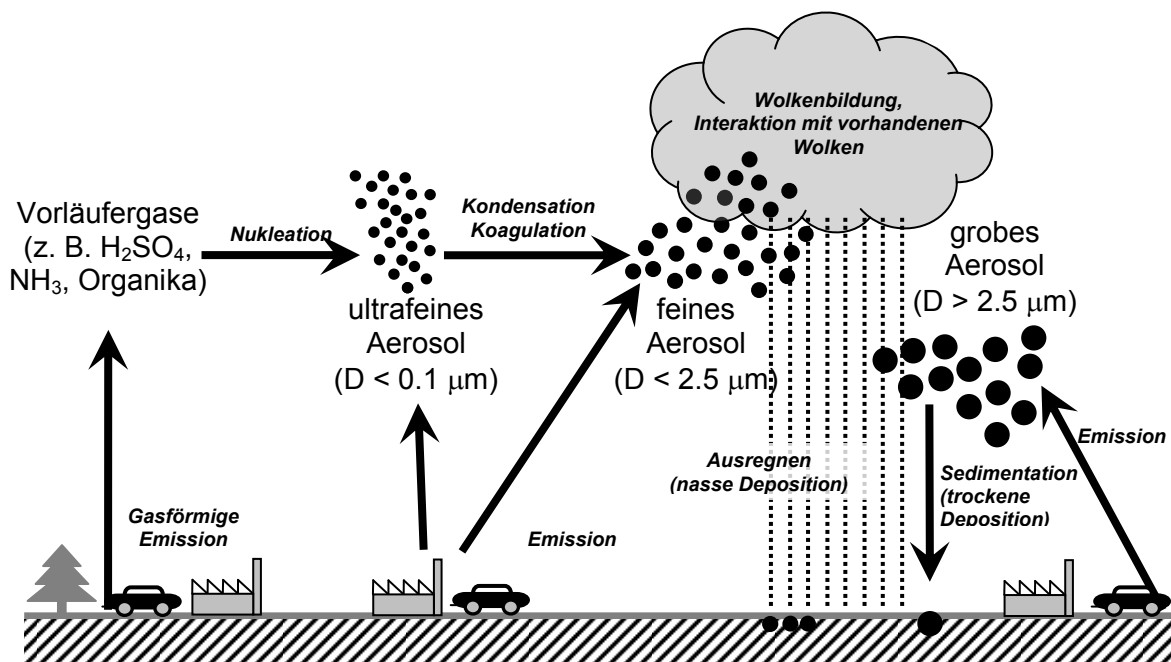


Abbildung 1 Vereinfachte Darstellung der wichtigsten Prozesse der Produktion, des Wachstums und des Verlustes der Aerosolpartikel in unserer Atmosphäre

2.4 Messverfahren

2.4.1 Messverfahren für Partikelanzahlkonzentration

Die Partikelanzahlkonzentration innerhalb eines definierten Grössenbereichs kann entweder direkt mit einem Partikelzähler oder durch Integration der Partikelanzahlgrössenverteilung aus einem Partikelgrössenanalysator bestimmt werden (vgl. auch Anhang 2).

Alle Messverfahren können mit entsprechender Vorbehandlung des Aerosols im Prinzip sowohl für Emissionen als auch für Immissionen eingesetzt werden.

- **Kondensationskernzähler (CPC)**

Bei feinen und ultrafeinen Partikeln werden oft Kondensationskernzähler (CPC) eingesetzt (siehe auch VDI 3867, Blatt 1 und 2). Das Messprinzip des CPCs beruht auf (a) dem Anwachsen der Aerosolteilchen durch Kondensation (Aktivierung) einer übersättigten Arbeitsflüssigkeit (Wasser, Alkohol) und (b) der Detektion der entstandenen Tröpfchen mittels Lichtstreuung. Bei Partikelanzahlkonzentration bis etwa 10^4 cm^{-3} können die Partikel durch Lichtstreuung an einzelnen Tröpfchen gezählt werden. Bei höheren Konzentrationen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als ein Partikel zur Intensität des gestreuten Lichts beitragen (Koinzidenz). Die Partikelanzahlkonzentration muss dann aufgrund der Intensität des an einem Kollektiv von Tröpfchen gestreuten Lichtes und einer vorherigen Kalibration der Lichtintensität ermittelt werden. CPCs können Partikel mit Durchmessern von wenigen Nanometern bis einigen Mikrometern detektieren. Es ist zu beachten, dass sehr kleine Partikel (Durchmesser kleiner als etwa 20 nm) nicht vollständig aktiviert werden, d.h. nicht zu genügend grossen Tröpfchen wachsen. Die Zähleffizienz der CPCs ist daher für die kleinsten Partikel reduziert bzw. allgemein vom Durchmesser abhängig (die untere Detektionsgrenze ist abhängig vom CPC-Modell).

- **Aerosol Elektrometer (und Konditionierung der el. Ladungen auf Partikel)**

Im Bereich der ultrafeinen Partikel kommen Aerosolelektrometer (AE) zum Einsatz. AE können eingesetzt werden, wenn die Partikel jeweils eine bekannte elektrische Ladung tragen. Dies ist im Prinzip hinter einem differentiellen Beweglichkeitsanalysator (DMA) der Fall. In einem AE werden die Partikel auf einem elektrisch isolierten Partikelfilter abgeschieden. Ihre Ladung überträgt sich auf den leitenden Filterkäfig und wird dann als elektrischer Strom gemessen. AE können Partikel von wenigen Nanometern Durchmesser bei höheren Anzahlkonzentrationen (über 1000 cm^{-3}) erfassen.

CPCs und AEs werden zur Messung der Partikelgrössenverteilung häufig in Kombination mit differentiellen Beweglichkeitsanalysatoren (DMA) oder Diffusionsbatterien (DB) eingesetzt (siehe 6.4.2).

2.4.2 Messverfahren für Partikelanzahlgrößenverteilung

Häufig eingesetzte Messverfahren für Partikelanzahlgrößenverteilung sowie deren wesentlichen Eigenschaften sind (vgl. auch Anhang 2):

- **Optisches Partikelmessgerät (OPC)**

Die Partikel werden mit einer Lichtquelle bestrahlt (monochrom oder polychrom, d.h. mit einer oder mehreren Wellenlängen). Die Intensität des gestreuten Lichtes wird unter einem bestimmten Winkel gemessen. Durch Verwendung von kugelförmigen Partikeln mit bekannten geometrischen Durchmessern und optischen Eigenschaften werden die OPCs kalibriert. Dadurch kann aus der Intensität des an Aerosolpartikeln gestreuten Lichtes deren so genannter optischer Durchmesser bestimmt werden. Die Lichtstreuung ist neben der Grösse noch von weiteren Partikeleigenschaften abhängig (z. B. von Form und Brechungsindex), so dass eine Umrechnung des optischen Durchmessers in andere Äquivalentdurchmesser mit grossen Unsicherheiten behaftet ist. OPCs können keine Aerosolpartikel mit einem Durchmesser kleiner 0.1 bis 0.5 μm erfassen. Da einzelne Partikel erfasst werden, kann die Messung mit einer Zeitauflösung von wenigen Sekunden erfolgen.

Beispiel: Vorsicht ist bei Russpartikel geboten. Diese Aerosole haben deutlich andere Brechungsindizes als die Kalibrieraerosole (meist Polystyrol-Kugeln) und können eine filigrane Struktur aufweisen. Dies kann zu erheblichen Unterschieden (Faktor > 10) zwischen geometrischen und optischen Durchmessern führen.

- **Analyse der elektrischen Beweglichkeit (z.B. SMPS)**

Im differentiellen Mobilitätsanalysatoren (DMA) werden die zu messenden Aerosolpartikel elektrisch geladen und in einen zylindrischen Kondensator geleitet. Die geladenen Partikel bewegen sich im elektrischen Feld gleichförmig zur inneren Elektrode hin, da sich sofort ein Gleichgewicht zwischen elektrischer Kraft und Gasreibungskraft einstellt. Da die Geschwindigkeit neben der elektrischen Feldstärke auch von der elektrischen Ladung, der Form sowie der Grösse der Partikel abhängt, können Partikel mit einer vorgewählten elektrischen Beweglichkeit (bzw. äquivalenten Beweglichkeitsdurchmesser) durch einen Spalt in der inneren Elektrode abgeführt und einem Partikelzähler (CPC oder AE) geleitet werden. Mit dem DMA können Partikel mit Beweglichkeitsdurchmessern von wenigen Nanometern bis etwa einem Mikrometer selektiert werden.

Partikelgrößenverteilung können gemessen werden, indem die Stärke des elektrischen Feldes variiert wird. Dies erfordert das stufenweise oder kontinuierliche Durchfahren des gesamten Spannungsbereichs und dauert zwischen 1 und 3 Minuten (Scanzeit). Das kontinuierliche Verfahren ist im SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) realisiert. Rasche Änderungen der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelgrößenverteilung während eines Messzyklus verfälschen das Messergebnis.

Bei einem anderen Verfahren werden die Partikel im DMA nicht durch einen Spalt abgeführt sondern deren Ladung wird direkt mittels Elektrometern an der DMA Wand detektiert. In kommerziellen Geräten sind mehrere Elektrometer (z.B. 22) untereinander angeordnet. Diese decken den ganzen Größenbereich (z.B. 5,6 bis 560 nm) ab und eine Partikelgrößenverteilung wird mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde gemessen. Der Nachteil dieser Methode ist eine vergleichsweise hohe Nachweisgrenze, insbesondere bei den kleineren Partikelfraktionen.

- **Flugzeit-Partikelspektrometer**

Aerosolpartikel werden durch eine Düse in eine sich unter reduziertem Druck befindende Kammer beschleunigt. Die Beschleunigung, welche ein Aerosolpartikel während dem Fluss durch die Düse erfährt, hängt dabei von dessen Trägheit und damit vom aerodynamischen Durchmesser ab. Mit zwei Lichtschranken wird die Flugzeit einzelner Partikel nach dem Eintritt in die Kammer gemessen und daraus deren aerodynamischer

Durchmesser bestimmt. Mit Flugzeit-Partikelspektrometern können Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von etwa 0.5 bis 20 μm detektiert werden. Durch Messung einer ausreichenden Anzahl von Partikeln und deren Einteilung in die zugehörigen Grössenklassen ergibt sich die Partikelgrössenverteilung mit einer Zeitauflösung von wenigen Sekunden.

- **Diffusionsbatterie**

Die Diffusionsbatterien bestehen meistens aus einer seriellen Anordnung von Metallnetzen mit geeigneter Maschenweite. Diese Metallnetze sind senkrecht zur Strömungsrichtung des Aerosols angebracht. Beim Durchströmen werden die Aerosolpartikel mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an den Metallnetzen abgeschieden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel abgeschieden wird, hängt von dessen Diffusionskonstanten und somit von der Partikelgrösse (diffusions-äquivalenter Durchmesser) ab. Die Abscheidungseffizienz von Aerosolpartikeln in einer Diffusionsbatterie kann bestimmt werden, indem vor dem ersten und nach allen Metallnetzen die Partikelkonzentration mit einem Partikelzähler (CPC) gemessen wird. Aus diesen Daten kann die Partikelanzahlgrössenverteilung der Aerosolpartikel bestimmt werden. Diffusionsbatterien werden gewöhnlich für Partikel mit Durchmessern von 2 bis 200 nm eingesetzt. Die Grössenauflösung von Diffusionsbatterien ist wegen der schwachen Abhängigkeit von Abscheidungseffizienz und Diffusionskonstanten gering. Dafür zeichnen sich Diffusionsbatterien durch eine hohe Zeitauflösung aus. In der elektrischen Diffusionsbatterie (EDB) werden die Partikel erst definiert elektrisch aufgeladen (typischerweise mittels einer Koronaentladung) und dann einer Diffusionsbatterie zugeführt. Die einzelnen Abscheidestufen sind mit Elektrometern verbunden und aus den gemessenen elektrischen Strömen lässt sich die Partikelgrössenverteilung berechnen.

- **Impaktion und Kaskadenimpaktion**

In einem Impaktor durchströmen Aerosolpartikel eine Düse, die auf eine Platte gerichtet ist. Dadurch werden die Partikel zu einer abrupten Änderung der Strömungsrichtung gezwungen. Abhängig von ihrer Trägheit bzw. ihrem aerodynamischen Durchmesser können die Partikel der Richtungsänderung folgen oder sie prallen auf die Platte und werden dort abgeschieden. Durch eine serielle Anordnung von Impaktoren mit abnehmendem Düsendurchmesser (sogenannte Kaskadenimpaktoren) können Partikel nach aerodynamischem Durchmesser getrennt gesammelt werden. Kaskadenimpaktoren werden für die Bestimmung der Grössenverteilung der Partikelmasse sowie der Grössenverteilung von Inhaltstoffen eingesetzt.

- **Elektrostatischer Niederdruckimpaktor**

Elektrostatische Niederdruckimpaktoren sind eine spezielle Variante von Kaskadenimpaktoren zur Messung von Partikelgrössenverteilung. Bei elektrostatischen Niederdruckimpaktoren werden die Partikel vor Eintritt in die erste Impaktoren elektrisch geladen. Durch die Abscheidung der Partikel wird Ladung auf die Impaktoren übertragen, die resultierenden elektrischen Ströme werden kontinuierlich gemessen und daraus Partikelgrössenverteilungen abgeleitet. Elektrostatische Niederdruckimpaktoren können Partikelgrössenverteilungen im Grössenbereich von etwa 10 Nanometer bis 10 Mikrometer messen. Aufgrund der Ladungsmessung sind diese Geräte jedoch nicht ganz so empfindlich wie die ersten drei der oben beschriebenen Messverfahren.

2.5 Artefakte bei der Messung von Partikeln

Die Fehler, welche bei der Messung von Partikelanzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung auftreten können sind vielfältig. An dieser Stelle werden die häufigsten Fehler beispielhaft beschrieben. Deren Ursache ist meist nicht einfach zu finden und zu vermeiden. Praktisch jede Anwendung erfordert eine detaillierte Betrachtung der Bedingungen und der möglichen Fehlerquellen.

2.5.1 Flussinstabilität durch Fremdeinwirkung

Die Flussmessung bzw. -regelung der Messgeräte basiert oft auf einer Druckdifferenzmessung über einer Kapillare oder einer Düse. Beide Systeme werden von der Geometrie der Kapillare oder Düse und von den Druckbedingungen beeinflusst. Die Geometrie und damit der Durchfluss ändern sich bei Verschmutzung. Nicht nur die Druckdifferenz sondern auch das absolute Druckniveau bestimmt die Durchflussrate. Deshalb führen Druckschwankungen im pneumatischen System (in den Ansaugleitungen und in der Abluft) zu Verfälschungen der Flussmessung und -regelung.

- Beispiele:
- a) Ein anlaufender Ventilator für die Entlüftung der Messkabine kann in einem geschlossenen Raum einen Unterdruck erzeugen und die Flussregelung stören. In der Zeit, bis die Regelung wieder den Sollwert erreicht, weicht der effektive Fluss bis zu zweistelligen Prozentbereichen ab und führt zu entsprechend falschen Resultaten.
 - b) Bei Druckschwankungen (z. B. durch eine Membranpumpe) kann die Flussmessung in Partikelmessgeräten erheblich gestört werden und zu Veränderungen des Messresultats führen. Ein Dämpfvolumen zwischen Pumpe und Durchflussmessung kann diese Effekte verringern.
 - c) Wird ein CPC bei hohen Partikelkonzentrationen lange betrieben, kann sich im Bereich der Kapillare Butanol ansammeln. Bilden sich dabei Tröpfchen kann dies zur Verminderung oder zu Schwankungen des Durchflusses führen.

2.5.2 Umschalten des Messverfahrens

Bei Messgeräten, die verschiedene Messverfahren oder Messmodi besitzen, kann es beim Umschalten des Modus erhebliche Abweichungen geben, wenn die Messbereiche unterschiedlich justiert wurden. Es ist die Messunsicherheit des jeweiligen Modus zu berücksichtigen. Daten, welche während des Umschaltens zustande kommen, sind allenfalls ungültig.

- Beispiel:
- Oft schalten CPCs bei hohen Konzentrationen vom Zählmodus in den so genannten Streulichtmodus um. Die Messunsicherheit im Streulichtmodus ist wesentlich höher, da das Ergebnis stärker vom Zustand der Optik abhängt und sich die Beziehung zwischen Streulichtintensität und Partikelanzahlkonzentration mit der Zeit ändert. Beim Wechsel zwischen den beiden Modi kann in älteren Modellen ein Sprung in der Konzentration beobachtet werden. Neuere Modelle vertuschen diesen Übergang indem sie ihn rechnerisch glätten.

2.5.3 Messung ausserhalb des zulässigen Messbereichs

Beim Verlassen des zulässigen Messbereichs (z. B. bei zu hoher oder zu tiefer Konzentration oder bei der Angabe von Ergebnissen ausserhalb des erfassten Grössenbereichs) steigt die Unsicherheit der Messung an. Einige Messgeräte geben in diesem Fall eine Warnung aus. In jedem Fall muss der Benutzer Warnungen bei der Datenerfassung aufzeichnen. Insbesondere bei Messungen an den Grenzen des Partikelgrössenbereichs muss man sich Rechenschaft über geräteinterne Annahmen und Extrapolationen ablegen.

- Beispiele:
- a) Bei zu hoher Verdünnung der Probenluft sind die Absolutwerte der Partikelanzahlkonzentration klein. Dann können wenige erfasste Partikel eine hohe Parti-

kelanzahlkonzentration vortäuschen, welche lediglich auf Schwankungen innerhalb des Geräteraushens und damit innerhalb der Messunsicherheit basiert.

- b) Als Koinzidenz bezeichnet man den Zustand, in welchem sich entgegen der Definition des Partikelzählers zum gleichen Zeitpunkt (= Messzeitpunkt) mehr als ein einzelnes Partikel im Messvolumen befinden. Dadurch werden mehrere Partikel als ein Partikel gezählt, wodurch die Partikelanzahlkonzentration zu tief gemessen wird. Bei Messgeräten, welche auch die Partikelgrößenverteilung basierend auf der Lichtstreuung im Messvolumen bestimmen, resultiert für den Partikeldurchmesser zu diesem Zeitpunkt ein zu hoher Wert. In Koinzidenz, über dem spezifizierten (Konzentrations-) Messbereich gemessene Werte sind nicht brauchbar.

2.5.4 Annahmen bei der Umrechnung von Messgrößen

Bei Partikelgrößenanalytoren bestimmt das physikalische Messprinzip die Art der Partikelgröße, die vom Messgerät ausgegeben wird (siehe Abschnitt 2.2.2 und Anhang 3). Eine Umrechnung in ein anderes Mass für die Partikelgröße kann möglich sein, basiert jedoch immer auf Annahmen über Aerosoleigenschaften. Häufig bestehen für die zu treffenden Annahmen grosse Unsicherheiten. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Beispiel: Die Größenklassierung von OPCs wird mit Polystyrol-Kugeln (PSL) kalibriert. Das Gerät zeigt die Partikelgröße als optischen Durchmesser an. Der ausgegebene optische Partikeldurchmesser stimmt nur für sphärische PSL-Teilchen mit dem geometrischen Partikeldurchmesser überein. Da sich die optischen Eigenschaften und die geometrische Form der zu messenden Partikeln von denen der PSL-Kugeln unterscheiden, dürfen optische Durchmesser nicht als geometrische Durchmesser interpretiert werden.

2.5.5 Zeitliches Verhalten des Messsystems

Die zeitliche Auflösung des gesamten Messsystems wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst: Verhältnis zwischen Volumen und Durchflussrate, Geometrie des Volumens (z. B. schlecht durchströmte Bereiche), Ansprechzeit der Detektion, sowie Ablauf der Messung. Je nach Messprinzip muss die Probenahme angepasst werden, um mögliche Fehler vermeiden (Stichwort: Puffervolumen (siehe auch Kapitel 3.8)).

- Beispiele:
- a) Der Aerosol-Neutralisator im SMPS wird nur schlecht und relativ langsam gespült. Nach sehr hoher Partikelanzahlkonzentration kann es je nach Partikelgröße sehr lange dauern, bis sich dieser "Partikelspeicher" wieder geleert hat und die Konzentration wieder mehrere Zehnerpotenzen zurückgeht (Schlatter, 2004).
 - b) Wenn eine signifikante Änderung der Konzentration oder der Partikelgröße an der Quelle rascher ist als die Scanzeit im SMPS-System, sind die einzelnen gemessenen Größenverteilungen nicht repräsentativ. Sie stellen weder den Anfangs-, noch den Endzustand, aber auch nicht einen „mittleren“ Zustand dar, sondern sind ein Zufallsresultat.
 - c) Eine signifikante Änderung der Partikelgröße an der Quelle kann zwar langsamer als die Scanzeit im SMPS-System sein, aber dennoch ist das System nicht ausreichend gespült. Dann können bimodale Größenverteilungen gemessen werden, wo der Hauptpeak die aktuelle Größenverteilung darstellt und der Nebenpeak aus „im Gerät zwischengelagerten“ Partikeln besteht (Memory-Effekt durch schlecht durchflutete Bereiche).

2.5.6 Lecks

Undichtigkeiten im pneumatischen System (Lecks) sind Ursachen für Messfehler. Die Druckverhältnisse am Ort des Lecks beeinflussen die Messung. Es ist sowohl eine Verkleinerung als auch eine Vergrößerung der Werte möglich. Ein grosser Druckunterschied zwischen Aerosolschlauch und der Umgebung führt zu grösseren Effekten.

Neben dem Umstand, dass durch ein Leck im Vergleich zur Messluft weniger oder stärker belastete Luft angesaugt werden kann, können sich durch ein Leck auch die Druckverhältnisse im Messsystem verschieben und somit das Verhalten des Messgerätes erheblich beeinflussen.

Beispiel: Ein Leck in einem saugenden System bewirkt eine Vermischung des Aerosols mit Umgebungsluft im Bereich des Lecks. Wenn die Falschlufte stärker belastet ist als das Aerosol, werden zu hohe Werte erfasst, andernfalls zu tiefe.

2.5.7 Örtliche und zeitliche Inhomogenität

Im Gegensatz zur Messung der Massenkonzentration (PM) dominieren bei der Partikelzählung in der Regel die kleinen Partikel. Diese treten vor allem in Quellennähe auf. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Partikelanzahlkonzentration aufgrund von Koagulation, Verdünnung oder Ablagerung an Oberflächen ab. Deshalb sind sowohl die zeitliche Variation der Quelle und die örtliche Inhomogenität massgebend dafür, welcher Wert für den Standort repräsentativ ist.

Beispiel:

- a) Am Ort der Verbrennung in einem Automotor finden sich ca. 10^{10} cm^{-3} , am Auslass noch mehrere 10^8 cm^{-3} da Koagulation und Ablagerung auf Oberflächen stattgefunden hat. Misst man neben einer Strasse wird diese Partikelanzahlkonzentration durch Umgebungsluft schliesslich nochmals verdünnt. In Städten findet man 10^4 bis 10^5 cm^{-3} , an abgelegenen Messstationen weniger als einige 10^3 cm^{-3} .
- b) Selbst in kleineren Räumen ist die Partikel- oder Staubbelastung der Innenluft nicht homogen verteilt. So können durch Sonneneinstrahlung Konvektionsströme entstehen, welche sedimentierte Partikel aufwirbeln. Ebenfalls können z.B. Veränderungen der Lüftungseinstellungen oder das Öffnen bzw. Schliessen von Türen die Messung beeinflussen, da ebenfalls Partikel aufgewirbelt werden und gleichzeitig andere Luft in den Raum gelangt.

2.5.8 Verschmutzung

Die Verschmutzung der Partikelmessgeräte ist immer verbunden mit einer zunehmenden Verfälschung der Messung (Drift). Das Messverfahren, die Konstruktion und der Gebrauch des Messgerätes sind für das Ausmass der Verschmutzung entscheidend. Deshalb kann keine allgemein gültige Regel für die Messbeständigkeit aufgestellt werden.

Die Verfälschung kann vom Messgerät selbst oft nicht unabhängig festgestellt werden. Deshalb ist eine periodische Kontrolle des Messgerätes durch Vergleich mit einem Referenzgerät unerlässlich (Kalibrierung). Erst bei zunehmender Erfahrung mit einem spezifischen Messgerätes bei einem spezifischen Gebrauch, kann das Kalibrierintervall optimiert werden.

Beispiel: Bei optischen Messverfahren, welche mit Lichtstreuung arbeiten, muss die langsame Verschmutzung und die Alterung der Lichtquelle und des Detektors beachtet werden, welche zur kontinuierlichen Abnahme der Lichtintensität führt. Dadurch ergibt sich mit steigender Betriebsdauer eine sinkende Empfindlichkeit des Messgerätes.

2.6 Darstellung von Partikelanzahl-Grössenverteilungen

Die Partikelgrössenverteilung kann auf verschiedene Art dargestellt werden. Die Darstellungsarten sind für die Kenngrössen der Verteilungen und die Interpretation der Ergebnisse entscheidend. In Anhang 5 befinden sich Beispiele für die Berechnung der Kenngrössen aus Grössenverteilungen. Die folgenden Darstellungselemente müssen für einen Vergleich von Resultaten aufeinander abgestimmt sein:

- Die Skala der Partikelgrösse (x-Skala) ist entweder linear oder logarithmisch. Das bedeutet, dass die Grössenklassen im ersten Fall jeweils gleich gross sind. Im zweiten Fall sind die Klassen für grosse Durchmesser breiter (Abbildung 2), aber die Differenzen ihrer Logarithmen sind konstant. Regelfall: Logarithmische x-Skala: $\log(d)$, $\ln(d)$
- Die Skala der Partikelmenge (y-Skala) ist linear oder logarithmisch. Bei einer linearen Darstellung entspricht die Fläche unter der Verteilungskurve der Menge der Partikel. Bei einer logarithmischen Skala gewinnen die Bereiche niedriger Konzentration graphisch an Bedeutung, was bei der Suche nach untergeordneten Partikelquellen helfen kann. Regelfall: Lineare y-Skala
- Die Skala der Partikelmenge (y-Skala) beschreibt die Partikelanzahldichte, die Volumendichte oder Massendichte. Je nach Skala unterscheidet sich die Partikelgrössenverteilung. Insbesondere sind der Mittelwert, der Modus und der geometrische Mittelwert verschieden (Abbildung 3). Regelfall: Anzahldichte: $dC/d \log(d)$
- Die Skala der Partikelmenge (y-Skala) beschreibt die differentielle $dC/d \log(d)$ oder die kumulative Partikelgrössenverteilung $F(d)$ (Abbildung 2). Die Darstellung der kumulativen Partikelgrössenverteilung ist von der Skalierung der x-Achse abhängig, sie zeigt die Lage der häufigsten Partikelgrösse jedoch weniger klar als die differentielle Darstellung. Regelfall: Differentiell: $dC/d \log(d)$

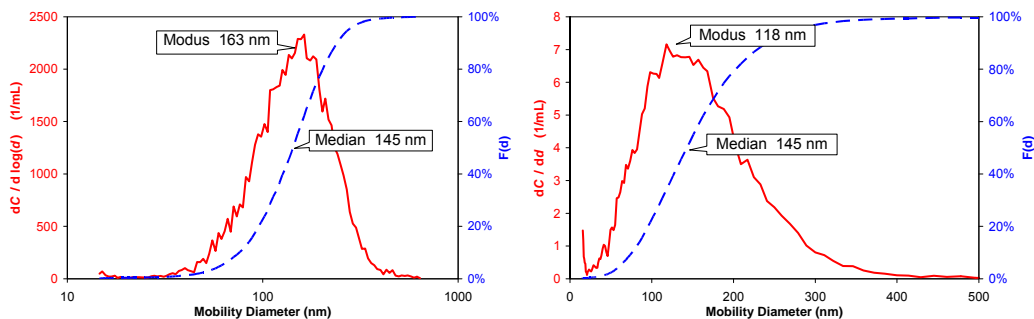


Abbildung 2 Gegenüberstellung der differentiellen $dC/d \log(d)$ und kumulativen $F(d)$ Partikelgrössenverteilung bei einer linearen und einer logarithmischen Grössenskala für die gleiche Partikelgrössenverteilung. Darin ist der Modus unterschiedlich und der Median bleibt gleich.

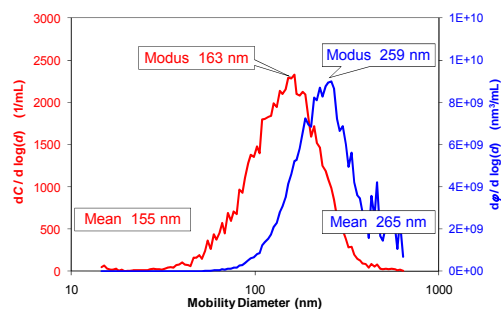


Abbildung 3 Gegenüberstellung der Partikelgrössenverteilung bezogen auf die Partikelanzahlkonzentration C und bezogen auf das Partikelvolumen ϕ (bzw. Partikelmasse bei konstanter Dichte). Sowohl der Modus als auch der Mittelwert (Mean) sind unterschiedlich.

3 Probenahme

3.1 Materialien der Probenahme

Um Partikelverluste durch elektrostatische Abscheidung in der Ansaugleitung zu verhindern muss die Ansaugleitung aus elektrisch leitendem Material mit einer glatten Innenfläche gefertigt sein. Bei vielen Anwendungen, insbesondere im Emissionsbereich oder zusammen mit chemischen Analysen, muss sie zudem korrosionsbeständig sein. Am besten eignen sich in der Praxis Sammelleitungen aus rostfreiem Stahl.

- Beispiel:
- Während ein flexibles Schlauchmaterial für die Trübungsmessung an Fahrzeugen geeignet ist, kann es für die Partikelmessung ungeeignet sein, wenn infolge einer Erwärmung aus dem Schlauchmaterial organische Verbindungen austreten und diese die Partikel beschichten oder gar neue Partikel erzeugt werden.
 - Das Schlauchmaterial kann das Messergebnis verfälschen, wenn chemische Reaktionen zwischen Schlauchmaterial (z.B. Reaktion mit Kupfer, Absorbieren in Kunststoffen) und Gaskomponenten im Aerosol auftreten, die bei der Partikelbildung eine Rolle spielen.

3.2 Ansaugen der Probeluft

Der Einlass der Probenahme muss eine hohe Transmission von Partikeln gewährleisten:

- Bei Immissionsmessungen sollte die Probenahme unabhängig von Luftströmungen sein (z. B. Windrichtung und vorherrschenden Windgeschwindigkeiten).
- Die Probe muss für das zu untersuchende Volumen repräsentativ sein. Insbesondere örtliche Inhomogenitäten müssen beachtet werden.
- Zeitliche Variationen der Probe müssen berücksichtigt werden. Bei langsamen Messverfahren ist der Einsatz eines Puffervolumens in die Probenahme zu prüfen.
- Der Einlass der Probenahme muss ungestört anströmbar sein. Bei Immissionsmessungen gelten für die Höhe der Probenahme über Umgebungsniveau die Empfehlungen für die Immissionsmessung von Luftfremdstoffen (BAFU 2004).
- Bei Immissionsmessungen und falls die Messaufgabe keine Erfassung von Partikeln grösser als 10 µm erfordert, kann sich der Ansaugkopf nach den Vorgaben der EN/CEN 12341 richten.
- Bei Messungen von Fein- und Ultrafeinpartikeln (< 1 µm) spielt die Orientierung der Öffnung des Ansaugrohrs keine Rolle. Es ist lediglich auf Inhomogenitäten des Aerosols im zu untersuchenden Volumen und einer örtlich und zeitlich repräsentative Probe zu achten.
- Werden Partikel grösser als 1 µm gemessen, soll ein vertikal ausgerichtetes Ansaugrohr verwendet oder die Aufenthaltszeit in der Probenahmeleitung minimiert werden. Falls die Deposition ganz grosser Partikel verhindert werden muss (z. B. Regen oder Schnee), kann eine Abdeckung über dem Rohrende montiert werden.
- Beim Ansaugen einer Probe in durchströmten Rohren sollten die Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr und in der Entnahme aufeinander abgeglichen werden (isokinetische Probenahme). Ist die Probenahme nicht isokinetisch, führt dies zu grössenspezifischen Verlusten (Abbildung 4). Je kleiner die Partikel sind, desto geringer sind die Fehler bei nicht isokinetischer Probenahme. Bei der ultrafeinen Fraktion können diese Verluste vernachlässigt werden.

- Beispiele:
- Um eine repräsentative Probe aus einem Messvolumen von einigen Kubikmetern zu erhalten arbeitet man in der Reinraumtechnik mit Durchflussraten von 30 L/min bis 50 L/min.

- b) Bei einer Probenahme mit Durchmesser 1 cm in einem Aerosolstrom von 1 m/s haben 10 µm-Partikel (1 g/mL) eine Stokeszahl¹ von $Stk = 0.06$ ($\sqrt{Stk} = 0.25$). Eine isokinetiche Probenahme ist zu empfehlen, denn ein Geschwindigkeitsquotient U_0/U von 2.0 führt zu rund 30 % höheren Konzentrationen in der Probenahme. Bei 1 µm-Partikeln beträgt die Stokeszahl nur noch $Stk = 10^{-3}$. Die Partikelanzahlkonzentration ist praktisch unabhängig vom Geschwindigkeitsquotienten.

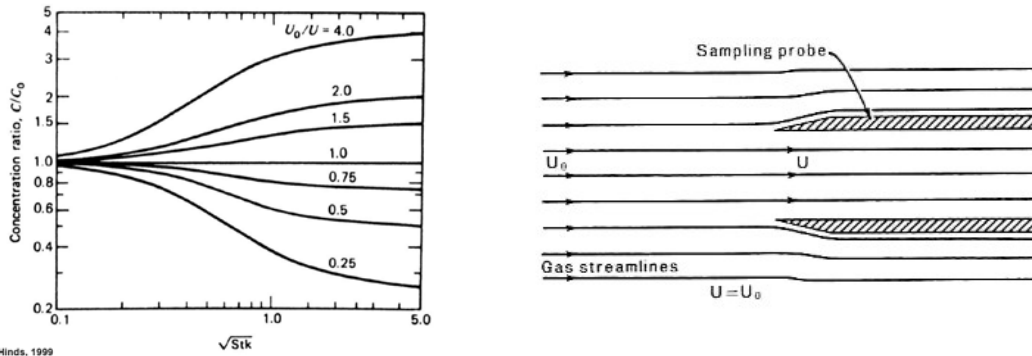


Abbildung 4 Abhängigkeit der Konzentration in einer Probe bei verschiedenen Geschwindigkeitsquotienten zwischen Umgebung U_0 und Probenahme U bei verschiedenen Stokeszahlen (Hinds, 1989).

3.3 Vorabscheider

Bei bestimmten Messaufgaben kann es notwendig oder sinnvoll sein, einen Vorabscheider (Impaktor oder Zyklon) vor dem Einlass des Partikelmessgerätes zu verwenden.

- Beispiele:
- Ein Impaktor als Vorabscheider ist bei Messungen mit einem SMPS-System unerlässlich. Dadurch ist ein maximal möglicher Partikeldurchmesser definiert. Diese Angabe ist notwendig, damit die Partikelgrößenverteilung korrekt berechnet werden kann.
 - Sollen Russpartikel im Nahbereich von Baumaschinen in einer Kiesgrube mit einer elektrischen Diffusionsbatterie gemessen werden, dann sollte ein Vorabscheider verwendet werden. Es ist zu erwarten, dass es an diesem Messort neben den Russpartikeln eine grosse Anzahl von groben mineralischen Partikeln gibt. Grobe Partikel können durch Impaktion auf der ersten Diffusionsstufe abgeschieden werden. Dadurch wird die Messung verfälscht.
 - Impaktoren als Vorabscheider im Probenahmesystem beeinflussen das Aerosol durch ihre Abscheidecharakteristik. Dadurch verändern sich sowohl die Partikelanzahlkonzentration als auch die Partikelgrößenverteilung, indem der obere Teil der Partikelgrößenverteilung abgeschieden wird. Die Abscheidung im Grenzbe- reich (Grenzkorndurchmesser = kleinstes gerade noch abgeschiedenes Teilchen) ist von der Durchflussrate abhängig, und sie ist keine absolute sondern eine statistische Grösse (Abscheideeffizienz)

3.4 Diffusions-, Sedimentations- und Impaktionsverluste

Partikelverluste in den Sammelleitungen treten vor allem durch Diffusion, Sedimentation und Impaktion auf und sollten möglichst minimiert werden. Wie unten anhand von Beispielen illustriert, können diese Verluste theoretisch berechnet werden. Bevor die Messresultate für die Verluste in den Zuleitungen korrigiert werden, empfiehlt es sich die berechneten Verluste durch Messungen zu überprüfen.

Die Verluste können minimiert werden, indem man möglichst kurze oder vertikale Sammel- leitungen mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Laminarbereich verwendet.

¹ Stokeszahl: $Stk = \frac{\rho_p d_{ae}^2 U C_c}{18 \eta D}$ mit Partikeleigenschaften (ρ_p : Dichte, d_p : Durchmesser, C_c Slip correction), U : Luftgeschwindigkeit, η : Viskosität der Luft, D : Durchmesser des Sonde

Die Verweilzeit des Aerosols in der Ansaugleitung sollte einerseits möglichst kurz sein, damit Diffusionsverluste an den Wänden minimiert werden. Andererseits sollte die Strömung laminar sein, um zusätzliche Partikelverluste durch Turbulenz zu verhindern. Idealerweise sollte die Strömung in der Ansaugleitung daher eine möglichst hohe Reynoldszahl aufweisen, aber 2000 an keiner Stelle überschreiten.

Die Diffusions- und Sedimentationsverluste in Aerosolsammelleitungen können durch Berechnungen abgeschätzt werden (Baron and Willeke, 2001). Der „Particle Loss Calculator“ ist ein neuer Algorithmus, mit welchem die diversen Partikelverluste in komplexen Aerosolsammelleitungen berechnet werden können (von der Weiden et al., 2009). Das Programm kann via Internet bezogen werden.

Abbildung 5 illustriert, dass Diffusionsverluste vor allem die ultrafeinen Partikel betreffen, im Unterschied zur groben Partikelfraktion, welche Sedimentationsverluste erfahren.

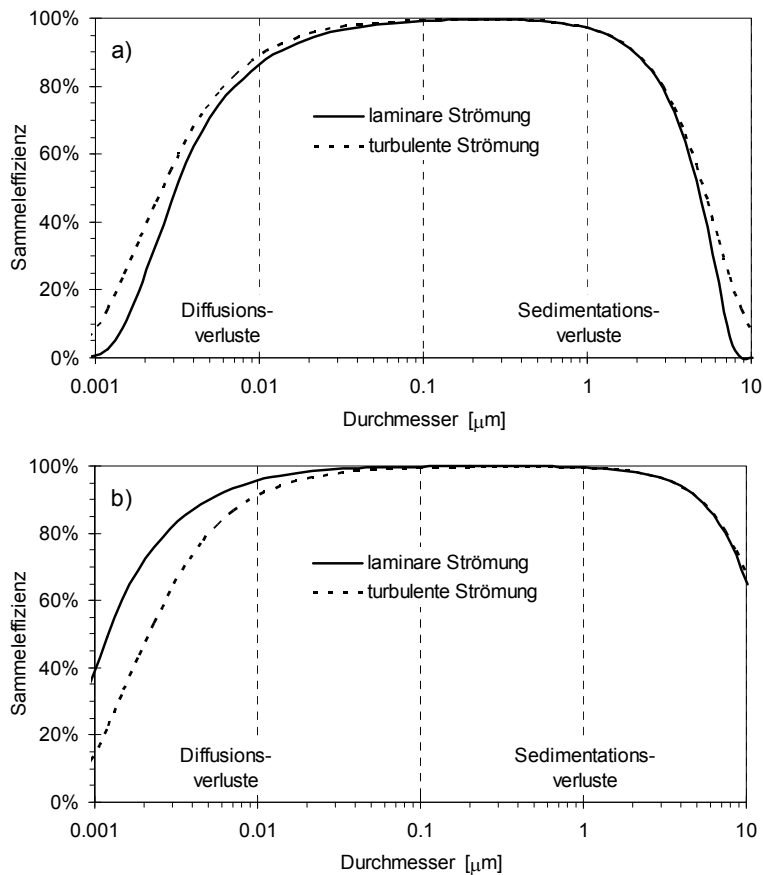


Abbildung 5 Diffusions- und Sedimentationsverluste gerechnet für eine 2 m lange Sammelleitung mit Innerdurchmesser von 1 cm und 45° Steigung (20°C, 1000 mbar, Dichte der Partikel 1.5 g/cm³). Die Flussrate beträgt in a) 1.5 L/min und b) 10 L/min. Gerechnet nach Baron and Willeke (2001).

Bei Grobpartikeln ($d > 2.5 \mu\text{m}$) können Sedimentationsverluste sowie Verluste durch Impaktion auftreten. Die Impaktionsverluste nehmen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu und können eine weitere Ursache von Verlusten sein. Die Ansaugleitung sollte so angebracht sein, dass das Aerosol möglichst vertikal und ohne starke Krümmungen zum Messgerät transportiert wird.

- Beispiele:
- Die Diffusionsverluste von 20 nm-Partikel in einem 2 m langen runden Rohr und bei einer Durchflussrate von 0.3 L/min betragen rund 16 %.
 - Die Sedimentationsverluste von 2 µm-Partikel in einem 2 m langen runden horizontalen Rohr und bei einer Durchflussrate von 1 L/min betragen rund 22 %

3.5 Verdünnung

Eine Verdünnung des Aerosols ist bei mindestens einer der folgenden Bedingungen in Betracht zu ziehen:

- Vermeidung des Streulichtmodus des CPC (unabhängig davon, ob der CPC als Teil eines SMPS verwendet wird oder nicht)
- Verminderung der Belastung des Messsystems bei hohen Partikelanzahlkonzentrationen
- Reduktion des Reinigungsaufwandes trotz hoher Partikelanzahlkonzentration
- Messung von Partikelfrachten, wenn die Beiträge aus Messperioden hoher Belastung wesentlich wichtiger sind als diejenigen bei niedriger Belastung
- Zur Trocknung des Aerosols, falls keine andere Möglichkeit vorhanden ist (kein Nafion-Trockner verfügbar oder einsetzbar).
- Zur Trennung fester von flüchtigen Partikeln in Kombination mit einer thermischen Behandlung (siehe auch Abschnitt 3.7)
- Reduktion der Temperatur bei Aerosolen aus einer heißen Quelle

Insbesondere für ultrafeine Partikel hängt das Verdünnungsverhältnis (Quotient aus Eingangs- zu Ausgangskonzentration) von der Partikelgröße ab. Je kleiner die Partikel sind, desto grösser sind die Diffusionsverluste und kleiner die Konzentration am Ausgang des Verdünners.

Bei der Verdünnung muss man quantifizieren, wie gross ihr Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung ist. Diese Quantifizierung erfolgt durch eine Kalibrierung bei den relevanten Partikelgrößen. Ist die Stabilität des Systems ausreichend, kann die Wiederholung der Kalibrierung mit Partikeln durch eine Kalibrierung der Flüsse ersetzt werden.

Die häufigsten Verdünnungssysteme sind: Bypass- und Injektorverdünner (Abbildung 6). In beiden Konstruktionen ist das Verdünnungsverhältnis abhängig von den Flussraten. Insbesondere die Messung und Kontrolle des Aerosolflusses (Q_1) sind schwierig, da sie bei Anwesenheit von Partikeln erfolgen muss. Weiter muss beachtet werden, dass sich die partikelfreie und die partikelhaltige Luft gut mischen.

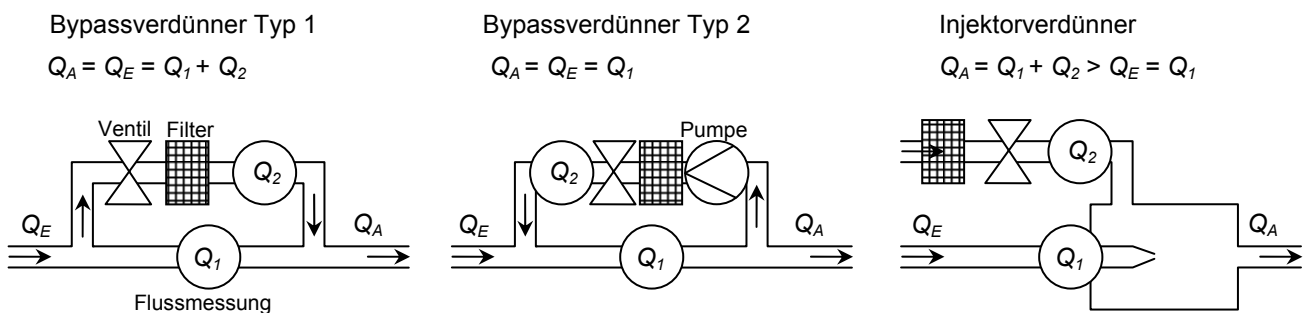


Abbildung 6 Prinzipschemata für Bypass- und Injektorverdünner. Nominales Verdünnungsverhältnis für beide Verdünnungssysteme beträgt: $C_E / C_A = (Q_1 + Q_2) / Q_1$

Diverse kommerzielle Angebote für Verdünnungssysteme mit festem Verdünnungsverhältnis (z. B. 10 oder 100 bei Injektorverdünner) oder mit einstellbarem Verdünnungsverhältnis (Bereich z. B. 10 bis 200) sind verbreitet. Aber eine vereinfachte Eigenkonstruktion ist durchaus möglich. Dabei ist auf eine gute Mischung des Aerosols zu achten.

3.6 Trocknen des Aerosols

Das Trocknen des Aerosols muss aus folgenden Gründen in Betracht gezogen werden:

- Aerosolpartikel erfahren mit zunehmender Luftfeuchtigkeit ein hygroskopisches Wachstum. Die Grössenverteilungsmessung soll deshalb unter trockenen Bedingungen (Relative Feuchte < 30 %) erfolgen, um die Vergleichbarkeit zwischen Messungen zu verbessern.
- Messgeräte nach dem Prinzip SMPS sind empfindlich gegenüber hoher Feuchtigkeit des Aerosols. Im kontinuierlichen Betrieb nimmt die Schleierluft (Sheath Air) langsam die Feuchtigkeit des Aerosols an. Wenn das Wasser die Leitfähigkeit der Luft oder der Isolatoren im DMA verringert, können elektrische Durchschläge auftreten. Dadurch können die polierten Oberflächen im DMA Schäden erleiden. Allenfalls muss der DMA bei reduzierten Spannungen betrieben werden.

Beispiel: Trockene Partikel können bei 90 % relativer Feuchte ihren Durchmesser verdoppeln.

Grundsätzlich muss bei der Verwendung von Trocknern bei Aerosolen mit Diffusionsverlusten von kleinen Partikeln gerechnet werden. Die Verluste sollten deshalb bei der verwendeten Konfiguration des Trockners (Geometrie und Flüsse) mittels Labormessungen quantifiziert werden.

Es empfiehlt sich den Trockner vor den Neutralisator zu platzieren. Die Effizienz des Trockners ist regelmässig zu prüfen, da sie sich wegen der Verschmutzung vermindert. Die Partikelverluste im Trockner müssen vorgängig charakterisiert werden.

- Beispiele:
- a) Nafion®-Trockner: Das Aerosol wird durch ein Rohr mit einer semipermeablen Membran geleitet. Im Gegenstromverfahren wird hinter der Membran das durch die Membran diffundierte Wasser von trockener Luft weggetragen. Dieser Trockner benötigt einen komplexeren instrumentellen Aufbau (zusätzliche Vakuumpumpe)
 - b) Diffusions-Trockner: Das Aerosol wird in einem Gitterrohr durch Silikagel geführt, wo der Wasserdampf aus dem Aerosol gebunden wird. Diese Trockner müssen regelmässig regeneriert werden und können relativ hohe Partikelverluste aufweisen.

3.7 Thermische Behandlung des Aerosols

Für bestimmte Messaufgaben kann es sinnvoll sein, flüssige Partikel oder flüssige und flüchtige Bestandteile von Partikeln vor der Bestimmung von Partikelanzahl oder Partikelgrössenverteilung zu entfernen.

Diese Behandlungen sind sehr kritisch und können infolge Thermophorese zu Partikelverlusten führen. Da die Partikelverluste zudem von der Beweglichkeit, d.h. vom Partikeldurchmesser abhängen, ist eine Kalibrierung des Verfahrens für die verwendeten Partikelgrössen unerlässlich.

Es können zwei Verfahren für die thermische Behandlung eingesetzt werden:

- Thermodenuder: Das Aerosol wird auf eine vorgegebene Temperatur aufgeheizt (z.B. 300°C) und flüchtige oder flüssige Bestandteile werden in die Gasphase überführt. Die flüchtigen Verbindungen werden in einem nachfolgenden gekühlten Bereich auf einem Adsorbens (z.B. Aktivkohle) abgeschieden.
- Verdünnungsmethode: Wie beim Thermodenuder wird das Aerosol zunächst aufgeheizt und flüchtige oder flüssige Bestandteile in die Gasphase überführt. Das heisse Aerosol wird anschliessend so stark verdünnt, dass die in die Gasphase überführten Verbindungen nicht wieder auf den Partikeloberflächen kondensieren.

Beispiel: Sollen bei der Bestimmung der Partikelanzahlemissionen von Motorfahrzeugen nur Feststoffpartikel berücksichtigt werden, dann können flüssige Partikel mit einem Thermodenuder aus der Abgasprobe entfernt werden.

3.8 Verwendung von Puffervolumen

Messverfahren, bei denen die Partikelkonzentrationen in verschiedenen Grössenklassen sequentiell bestimmt werden (insbesondere SMPS-Systeme), benötigen für die Bestimmung der Partikelgrössenverteilung eine Zeit von wenigen Minuten. Da an quellennahen Messpunkten (z.B. an verkehrsnahen Standorten) die zeitliche Schwankung von Partikelgrössenverteilungen gross sein kann, können die gemessenen Grössenverteilungen falsch sein. Bei solchen Messanordnungen sollte ein Puffervolumen in das Einlasssystem eingebaut werden, da dadurch die zeitlichen Schwankungen des dem Messgerät zugeführten Aerosols gedämpft werden.

Die Grösse des Puffervolumens sollte so dimensioniert sein, dass die mittlere Verweilzeit der Partikel etwa der Messzeit für eine Partikelgrössenverteilung entspricht. Die grössenabhängigen Partikelverluste während der Verweilzeit im Puffervolumen müssen bestimmt und die gemessenen Partikelgrössenverteilungen nachträglich korrigiert werden.

3.9 Flussteiler (Flow Splitting)

Der Probenahmefluss muss in mehrere Teilflüsse aufgetrennt werden, falls mehrere Messgeräte parallel betrieben werden oder wenn die Aufenthaltszeit der Probe in der Zuleitung minimiert werden soll und dies nicht durch Kürzen der Leitung realisiert werden kann.

Die Auftrennung von Probenahmeflüssen kann zum Entmischen der Partikel aufgrund der grössenabhängigen Impaktion führen (vgl. Kapitel 3.3). Zusätzlich ist es möglich, dass in den Teilflüssen unterschiedliche Diffusionsverluste (wegen unterschiedlichen Aufenthaltszeiten) auftreten.

Die erste Variante zur Aerosolaufteilung ist ein Y-Stück mit einem Eingang und mehreren Ausgängen: Bei diesem System entspricht der Gesamtfluss am Eingang der Summe der Teilflüsse. Die gegenseitige Abhängigkeit der Teilflüsse wirkt sich jedoch sehr oft auf die Messung aus.

- Beispiele:
- a) Wenn der Gesamtfluss als Summe der Ansaugraten der einzelnen Messgeräte resultiert, hängen die Flussverhältnisse von allen Messgeräten ab. Bei jeder Veränderung des Aufbaus sind die Aufenthaltszeiten und die grössenabhängigen Diffusionsverluste betroffen und die Resultate können verfälscht werden.
 - b) Das Ein- oder Ausschalten von Messgeräten in einem solchen System verändert aufgrund des dynamischen Widerstands die Druckverhältnisse. Die Resultate druckempfindlicher Messgeräte – z.B. CPCs – werden dadurch gestört oder sogar verfälscht.

Als zweite Variante ist die Verwendung einer Sammelleitung mit einem grossen Volumenstrom zu nennen: Die Messgeräte entnehmen isokinetisch einen Teilstrom aus der Sammelleitung. Wenn nun die Entnahme einzelner Geräte nur einen kleinen Anteil des zur Verfügung stehenden Aerosols ausmacht, ist die gegenseitige Beeinflussung gering. Hingegen muss beachtet werden, dass ein Unterdruck in der Sammelleitung oder Druckschwankungen aufgrund von Pulsationen der Pumpe auftreten können.

- Beispiel:
- Bei einem Unterdruck in der Sammelleitung ist bei druckempfindlichen Messgeräten (z.B. CPC) eine zusätzliche externe Pumpe notwendig. Pulsationen können die Flussregelung von CPCs stören und sollten vermieden werden.

Als dritte Variante ist die Verwendung eines Puffervolumens: Hier wird das Aerosol in einem grossen Puffervolumen den Messgeräten zur Verfügung gestellt. Diese entnehmen ihren Bedarf aus dem Volumen. Bei diesem System ist zu beachten, dass das Volumen zur Dämpfung der zeitlichen Schwankungen der Partikelanzahlkonzentration führt und Diffusionsverluste die Messungen verfälschen können.

3.10 Spezifische Besonderheiten bei Emissionsmessungen an Industrie- und Gewerbeanlagen

Gegenüber Immissionsmessungen können bei Emissionsmessungen die vorherrschenden Randbedingungen in der zu beprobenden Abluft (bzw. Abgas) eine genaue Messung der Partikelanzahlkonzentration und –Größenverteilung zusätzlich erschweren.

Oft müssen bei der Probenahme der Partikel an einem Abluftkanal spezifische Anpassungen am Messaufbau vorgenommen werden. Die Auswahl der infrage kommenden Probenahmegeräte und Partikelanalytoren kann zudem eingeschränkt sein.

Bei Partikel-Emissionsmessungen an Industrie- und Gewerbeanlagen sind die im Folgenden genannten Besonderheiten zu beachten:

- Je nach Lage einer Messstelle innerhalb der Ablufführung einer Prozess- oder Verbrennungsanlage können im Abluftkanal *grosse Unter- oder Überdrücke (oder Pulsationen)* existieren. Sie können die Partikelmesstechnik deutlich negativ beeinflussen. Bei starken Unterdrücken kann sich die Problematik von möglichen Falschluff-Lecks sowie inkorrekten Durchflüssen im Probenahme- und Analysesystem verschärfen. Bei sehr ungünstigen Druckverhältnissen sollten geeignetere Probenahmestandorte innerhalb der Ablufführung gesucht werden.
Beispiel: Bei Industrie- und Gewerbeanlagen sind Unterdrücke von -5 bis -20 mbar gegenüber dem Atmosphärendruck keine Seltenheit; in Extremfällen sind zwischen Gewebefiltern und Saugzugventilatoren bis zu -80 mbar möglich.
- Beim gleichzeitigen Vorkommen grösserer und kleinerer Partikel (*vom Mikrometerbereich bis zum Nanometerbereich*) sollte die Probenahme mit einem definierten Düsen Eintritt isokinetisch erfolgen. Unter Umständen ist eine spezielle Vorabscheidung von grösseren Partikeln notwendig. Die üblichen Anforderungen an eine Messstelle hinsichtlich ausreichend langer gerader Ein- und Auslaufstrecken sind in jedem Fall zu beachten (BUWAL 1996).
- Bei Partikelmessungen in *feuchtegesättigter* Abluft ist der ausreichenden Beheizung sämtlicher Probenahmebauteile zwischen Entnahmedüse und Verdünnungseinheit besondere Beachtung zu schenken. Kältebrücken, an denen Taupunktunterschreitungen auftreten können, müssen unbedingt vermieden werden. Unter Umständen ist ein Injektionsverdünner oder ein Diffusionstrockner vorzuschalten.
Anmerkung a) Hinter einem Wäscher kann das Abgas sogar übergesättigt sein.
b) Speziell sei auf mögliche hygroscopische Effekte sowie Taupunktniedrigungen gegenüber reinem Wasser durch die im Abgas / in der Abluft eventuell zusätzlich vorhandenen gasförmigen oder gelösten Spurenstoffe (z.B. SO₂, SO₃, H₂SO₄, Salze) zu achten.
c) Bei Taupunktunterschreitungen oder beinahe-Taupunktunterschreitungen können im nachfolgenden Probenahme- und Analysesystem ein Partikelwachstum und ein Partikelverlust auftreten. Solche unerwünschten Effekte können nur mit einem vorgeschalteten Trockner verhindert werden.
- Bei bestimmten Prozessanlagen kann die Zusammensetzung der Abluft unter Umständen deutlich von der der Umgebungsluft abweichen. Die Zusammensetzung der mit trockener Umgebungsluft verdünnten Abluft hängt dann auch Verdünnungsverhältnis ab. Die veränderte Gaszusammensetzung im Probenahme- und Analysesystem kann zu fehlerhaften Flussmessungen sowohl bei der Verdünnung als auch in den Messgeräten führen. Da sie die Dichte und die Wärmekapazität der Gase bestimmt, ist sie bei Messgeräten mit Massendurchflussregeln zu berücksichtigen
Anmerkung: Die Gaszusammensetzung bei Anlagen der chemischen Industrie oder bei speziellen Verbrennungsprozessen ist zu beachten. So sind in Zementwerken beispielsweise CO₂-Gehalte von 25 bis 30 Vol.-% (bezogen auf trockenes Abgasvolumen) möglich.

- Bei Prozessanlagen, in denen mit *organischen Lösemitteln* gearbeitet wird (z.B. Anlagen zur Oberflächenbeschichtung, Anlagen der pharmazeutisch-chemischen Industrie), ist mit halbflüchtigen Verbindungen in derart hoher Konzentration zu rechnen, dass die vor einer Abgasverdünnung gewählte Probenahme-Temperatur sowie das gewählte Verdünnungsverhältnis eventuell entscheidenden Einfluss auf Verteilung dieser Lösemitteln zwischen der Gas- und Partikelphase erhält. In diesen Fällen muss die Probenahme-Temperatur und das Verdünnungsverhältnis sehr exakt eingestellt und überwacht werden.

Anmerkung: Bei VOC-Emissionsmessungen mit Flammenionisationsdetektoren wird wegen dieser temperaturabhängigen Verteilungsproblematik üblicherweise die Probenahmeapparatur (inkl. beheiztem Vorfilter) auf eine per Definition gesetzte "Referenztemperatur" von 150°C beheizt (BUWAL 1996).

- Bei bestimmten *Oberflächentechnik-Prozessen* (z.B. Plasmabeschichtungsanlagen zur Herstellung von Solarzellen oder Plasmabeschichtungsanlagen zur Beschichtung von Textilgewebe) ist bei der daraus abgeführten Abluft mit geladenen Teilchen (Ionen) in höherer Konzentration zu rechnen. Ob und inwieweit solche, aus einem Plasma emittierten geladenen Teilchen eine mit den üblichen Methoden durchgeführte Partikelanzahl- und Grössenverteilungsmessung beeinflussen, kann nicht genau vorhergesagt werden. Bei solchen Prozessanlagen ist deshalb der Möglichkeit einer unerwünschten Beeinflussung (insbesondere im Bereich der Partikel-Probenahme) vorsorglich besonderes Augenmerk zu schenken.

Anmerkung: In SMPS-Systemen ist zwar ein Neutralisator eingebaut, dieser vermag jedoch bei sehr hoher Aufladung der Partikel am Eingang das Aerosol nicht vollständig zu neutralisieren.

- Für Partikel aus klassischen Verbrennungsprozessen wird oft eine *Partikeldichte* von 1 g/cm^3 angenommen. Für Partikel im Nanometerbereich aus anderen Quellen (insbesondere aus Hochtemperaturquellen der Metallverarbeitenden Industrie, kann man deutlich höhere Partikeldichten vermuten, wobei diese meist nicht bekannt sind und abgeschätzt werden müssen. Die Einflüsse der Partikeldichte auf die mit verschiedenen Partikelmessgeräten gemessenen Partikelgrössenverteilungen (d.h. eventuelle Verschiebungen in der Anzahl-, Oberflächen-, und Volumenverteilung bei Gerätekalibrationen mit Latexaerosolen) sind zu diskutieren. Zu berücksichtigen ist dies insbesondere bei der Interpretation des aerodynamischen Durchmessers oder der Berechnung der Partikelmasse.

Beispiel: Die Elementanalyse von (hinter Gewebefilter genommenen) Reingas-Stäuben aus Elektrostahlwerken zeigt einen Anteil von üblicherweise bis zu etwa 50 Massen-% an Schwermetallen und zu etwa 50 Massen-% an Eisenoxid. Daraus folgt eine mittlere Materialdichte von etwa 7 g/cm^3 . Die Partikeldichte wird deshalb klar über 1 g/cm^3 aber unter Berücksichtigung von Partikel-Formfaktoren unterhalb der 7 g/cm^3 liegen.

- Werden die Apparaturen zur Messung der Partikelanzahlkonzentration und – Grössenverteilung sehr intensiv für Emissionsmessungen eingesetzt, so ist einer eventuell schleichenden Geräteverschmutzung sowie Korrosion besonderes Augenmerk zu schenken.

Beispiele a) Durch Kondensation oder Adsorption von Kohlenwasserstoffen können isolierende Beschichtungen entstehen.
b) Korrosion in Durchflussreglern

4 Qualitätssicherung

4.1 Zweck der Qualitätssicherung

Das Ziel von Qualitätssicherungsmaßnahmen ist die Gewährleistung einer bekannten und gleich bleibend hohen Datenqualität. Das Erheben von Kenngrößen des Gerätezustands trägt ebenso dazu bei, wie die kontinuierlichen Wartungsarbeiten am Gerät und eine lückenlose Datenkontrolle und -validierung. Darüber hinaus können durch Qualitätssicherungsmaßnahmen Gerätedefekte früh erkannt und schwerwiegendere Defekte und längere Datenausfälle verhindert werden.

Teil der Qualitätssicherungsmaßnahmen ist zudem die Abschätzung und Angabe der Messunsicherheit. Eine Anweisung für die Verfahren finden man in JCGM (2008).

4.2 Flusskontrolle

Der Aerosolfluss ist – neben der Partikelanzahl – die zentrale Messgrösse zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration. Ihm sollte eine grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Empfohlen wird eine kontinuierliche Aufzeichnung sowie eine regelmässige Kalibrierung.

Bei einer kontinuierlichen Aufzeichnung kann entweder direkt der Fluss, oder bei einer kritischen Düse der Sekundärdruck, erfasst werden. Die Aufzeichnung der Druckdifferenz reicht aber bei einer Flusssteuerung via Kapillare nicht aus. In diesem Fall hängt der Fluss sehr empfindlich vom Absolutdruck sowohl auf primärer als auch auf sekundärer Seite ab.

4.3 Leckprüfung

Ein Messsystem muss regelmässig bzw. vor jeder Messung auf Lecks überprüft werden. Für die meisten Produkte ist das Vorgehen zwar im Handbuch zum Messgerät beschrieben, die Prüfung muss aber das ganze System von der Probenahme bis zum Detektor abdecken.

Generell kann ein Lecktest ohne eine Zerlegung des Geräts mit einem hocheffizienten Inline-Filter (Abscheidegrad $\geq 99.999\%$, HEPA = High Efficiency Particulate Airfilter) durchgeführt werden. Dazu wird der Filter an die Ansaugöffnung des Messsystems angeschlossen und der Verlauf der Partikelanzahlkonzentration beobachtet. Entsprechend dem Abscheidegrad des Filters dürfen mit dem vorgeschalteten Filter keine oder nur noch vereinzelte Partikel gezählt werden.

Beispiel: Bei einem Abscheidegrad von 99.999% gelangt theoretisch eines von 100'000 Partikeln durch den Filter. Zusätzlich zum Abscheidegrad muss bei der Auswahl des Filters auch die Filtercharakteristik bezüglich des Partikeldurchmessers beachtet werden.

Eigentlich ist es wünschenswert mit dem Prüffilter eine relativ grosse Druckdifferenz zu erzeugen, da so auch kleine Lecks gefunden werden können. Allerdings reagieren die meisten Partikelmesssysteme äusserst empfindlich auf Druckänderungen oder können sogar beschädigt werden. Daher muss das eingesetzte Filter auch bezüglich der Druckdifferenz auf das Gerät abgestimmt sein.

Wurden mit der Filtermethode Lecks nachgewiesen, müssen diese lokalisiert und behoben werden. Hierzu können vom Hersteller empfohlene Prozeduren, eventuell vorhandene Differenzdruckmessungen oder Statusparameter des Messgeräts verwendet werden. Ist dies nicht möglich, muss das Leck durch Evakuierung einzelner Teile des pneumatischen Systems gesucht werden (ACHTUNG: Garantiebestimmungen und Gefahr von Beschädigungen).

4.4 Wartung und Justierungen

Die Wartung der Messgeräte durch den Hersteller oder den Betreiber kann je nach Tiefe des Eingriffs die Ergebnisse erheblich verändern. Deshalb ist zu empfehlen, Geräte vor und nach einer Wartung zu kalibrieren, damit die Veränderungen dokumentiert werden können.

4.5 Datenauswertung und Dokumentation

Die Datenauswertung erfolgt in der Regel mit Software des Messgeräteherstellers. Die Auswertungsalgorithmen können sich von Version zu Version ohne Mitteilung des Herstellers verändert haben. Zudem können Konstanten durch den Benutzer eingegeben werden. Deshalb sind folgende Parameter zwingend festzuhalten:

- Softwarebezeichnung und -version des Steuer- und Auswertungsprogramms
- Veränderbare Parameter des Programms (z. B. Viskosität der Luft, Umgebungsbedingungen, Messgeschwindigkeit, Gasflüsse)
- Gerätekonfiguration, und -Parameter, Einstellungen der Kalibrierung

Die Dokumentation der Messergebnisse richtet sich nach den Vorgaben in den CercI'Air Empfehlungen Nr. 13.

4.6 Kalibrierung

Partikelanalytoren zur Messung der Partikelgrößenverteilung und der Partikelanzahlkonzentration bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten – von der Probenahme, über die eingesetzten Messgeräte bis zur Datenerfassung.

Beispiel: Zum Gesamtsystem SMPS gehören neben den Hauptkomponenten DMA und CPC ebenso Software, allenfalls Trockner, Neutralisator, Impaktor, Verbindungsschlauch zwischen DMA und CPC und die gewählten Einstellungen (Flussraten, Scanzeiten, Konstanten für Viskosität etc.).

Eine periodische Überprüfung des Gesamtsystems bei den eingesetzten Einstellungen ist Grundlage für vertrauenswürdige Ergebnisse. Diese Überprüfung erfolgt beispielsweise bei einer Kalibrierung mit einem rückverfolgbaren (nationalen) Normal. Eine Kalibrierung besteht aus einer Vergleichsmessung zwischen dem Prüfling und einer auf nationale Normale rückverfolgbaren Referenz unter praxisnahen Messbedingungen (Abbildung 7).

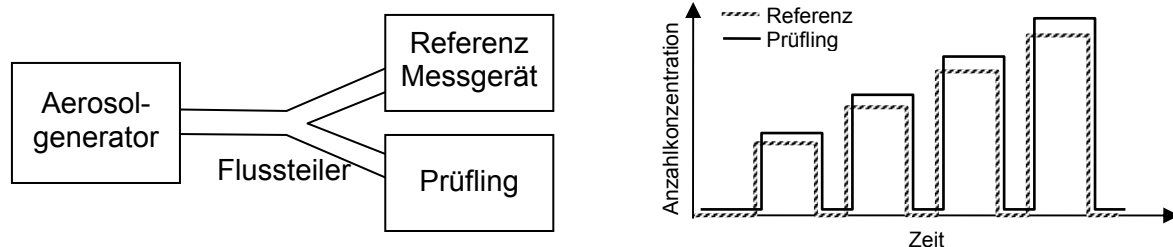


Abbildung 7 Schematischer Aufbau und Ablaufschema einer Kalibrierung. Während der Kalibrierung wird das Aerosol mit stufenförmig geänderter Konzentration gleichzeitig den beiden Geräten zugeführt. Die Kontrolle bei Nullluft zwischen den Stufen ermöglicht Lecks zu erkennen und das Zeitverhalten zu beobachten.

Die folgenden Punkte sind bei einer Kalibrierung zu beachten. In der Regel wird dies durch das Kalibrierlabor beim Festlegen der Kalibrierprozedur diskutiert:

- **Rahmenbedingungen für den Messgeräteinsatz:**
Als Bezugsgrösse für Anzahlkonzentration muss ausgewählt werden: aktuelle Umgebungsbedingungen, Normal- oder Standardbedingungen. Ausserdem sind die Hilfsgrössen zu identifizieren (z.B. Aerosolfluss, Stabilisierungstemperatur, Barometer, Detektorspannung). Daraus folgt, welche Hilfsgrössen erfasst werden müssen.
- **Anforderungen an das Aerosol:**
Die Zusammensetzung der Partikel soll diejenige in der Anwendung repräsentieren (Verbrennungspartikel, Polystyrolpartikel, Salzpartikel etc.; Grössenverteilung monodispers oder polydispers). Die Stabilität des Aerosols bezüglich Anzahlkonzentration und Grösse muss ausreichend sein.
- **Aufteilung des Aerosols für Referenzgerät und Prüfling:**
Die Aufenthaltszeit in Teilflüssen sollten möglichst gleich sein, um unterschiedliche Diffusionsverluste oder Koagulation zu vermeiden. Grundsätzlich sind kurze Verbindungsleitungen anzustreben.
- **Referenzmessgerät (rückverfolgbares Normal):**
Die Messgrösse des Referenzmessgeräts muss mit derjenigen des Prüflings übereinstimmen. (Grundsatz: Gleiches kann nur mit Gleichem kalibriert werden).
- **Ablauf muss praxisnah aber zweckmässig sein:**
Die Zusammensetzung, die Konzentration und Partikelgrösse soll möglichst den ganzen Anwendungsbereich abdecken.

- Beispiele:
- a) Der Umgebungsdruck bestimmt den Durchfluss und damit die Anzahlkonzentration. Das Verhalten und die Veränderung des Durchflusses infolge einer Luftdruckänderung sind zu beachten, wenn die Kalibrierung nicht am Standort durchgeführt wird.
 - b) Die Zerstäubung von Polystyrol-Kugeln erzeugt nicht nur ein Aerosol aus diesen Kugeln sondern auch aus einer weit grösseren Anzahl kleiner Partikel unterhalb von 100 nm (Residuen). Dieses Aerosol kann nur dann für die Kalibrierung der Anzahlkonzentration eingesetzt werden, wenn beide Geräte die Residuen gleich behandeln (z.B. im OPC können diese oft nicht gemessen werden) oder wenn die Residuen eliminiert werden (z.B. mittels DMA).
 - c) Eine Kalibrierung eines Partikelzählers mit einem gravimetrischen System (und umgekehrt) sollte vermieden werden, da beispielsweise bei einer Veränderung der Partikelgrösse die Masse der Partikel ändert ohne Änderung der Anzahl).
 - d) Der Vergleich verschiedener Durchmessertypen (Beweglichkeitsdurchmesser, aerodynamischer Durchmesser, optischer Durchmesser) ist jeweils nur bei einem klar definierten Aerosol möglich und kann nicht auf andere Aerosole angewandt werden. In der Reinraumtechnik wird die Grössenklassierung der OPC mit Polystyrol-Kugeln justiert. Beim Einsatz der OPC im Reinraum sind die Geräte anderen Aerosolen ausgesetzt. Demzufolge erfassen verschiedene OPCs nicht exakt die gleichen Grössenverteilungen.

Anhang 1: Beispiele von Aerosolarten und -quellen

Bezeichnung	Anwendung/Quellen	Inhaltsstoffe (z. B.)	Typ	Grösse	Menge
Dieselrauch	Auspuffendrohr	EC, OC	E / I	5 ... 300 nm	$<10^9 \text{ cm}^{-3}$
Atmosphärisches Sekundäraerosol	Homogen nukleierte Partikel oder als „Kondensat“ auf andere Partikel	OC, Ammoniumsulfat,	I	5 ... 300 nm	$<10^5 \text{ cm}^{-3}$
Ölfeuerung	Verbrennung von Heizöl (extra leicht, usw.)	EC, OC	E	$< 10 \mu\text{m}$	
Kontrolliertes Holzfeuer	Heizungen mit Schnitzel, Pellets oder Stückholz	Mineralisch, EC, OC	E	10 ... 500 nm (z.T. grösser)	$<10^9 \text{ cm}^{-3}$
Offenes Holzfeuer	Cheminée, Wald-, Gartenfeuer	Mineralisch, EC, OC	E	nm bis mm	
Unkontrolliertes Feuer	Brandunfälle, Feuerwerk (BAFU 2001), Sprengungen	z.B. EC, OC, Al, Ba, Pb, Cu, Sr, V	E	nm bis mm	variabel
Bürogeräteemissionen	Arbeitsplatz mit Druckern, Kopierern etc.		E	typischerweise. 5 ... 30 nm	$<10^6 \text{ cm}^{-3}$
Zigarettenrauch	Arbeitsplatz, Innenraum	OC in Tröpfchen	E / I	10 ... 300 nm	$<10^6 \text{ cm}^{-3}$
Schweissrauch	Arbeitsplatz	Agglomerat aus Metall, Metalloxide	E / I	$< 1 \mu\text{m}$	$<10^7 \text{ cm}^{-3}$
Holzstaub	Arbeitsplatz mit Schleifen, Sägen	OC, biologisch	E / I	μm bis mm	
Lackieren	Arbeitsplatz zum Spritzen von Lacken, Lösungsmittel		E / I	μm bis mm	

Bezeichnung	Anwendung/Quellen	Inhaltsstoffe (z. B.)	Typ	Grösse	Menge
Kochen	Braten mit Fett, Grill, Frittieren	OC in Tröpfchen	E / I	nm bis mm	$<10^4 \text{ cm}^{-3}$
Nanotechnologie	Arbeitsplatz, Anwender	diverse	E / I	per Definition <100 nm	$<10^5 \text{ cm}^{-3}$
Biogene Aerosole	Sporen, Pollen, Pflanzen-, Tier- fragmente, Pilze, Bakterien	biologisch, Allergene	I	3 10 μm	$<10^3 \text{ cm}^{-3}$
Mineralische Aerosole	Saharastaub, Salzaerosol, Stras- senabrieb	SiO ₂	I	μm bis mm	$<10^3 \text{ cm}^{-3}$

Abkürzungen/Erläuterungen:

EC Elementarer Kohlenstoff (Kern der Primärpartikel, graphitartige Struktur)

OC Organischer Kohlenstoff (z.B.: direkt emittierte schwerflüchtige organische Verbindungen, oder in der Atmosphäre umgewandelte flüchtige organische Verbindungen)

Typ E = Emissionen (quellen-, verursachernah, Quelle klar identifizierbar und lokalisierbar)

I = Immissionen (quellenfern, transformiert, nah an Belasteten)

Anhang 2: Übersicht über Messverfahren


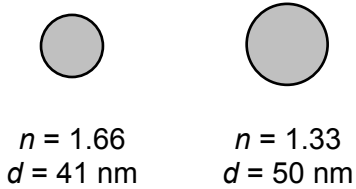
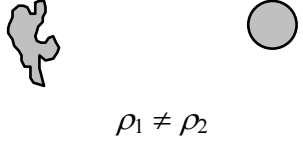
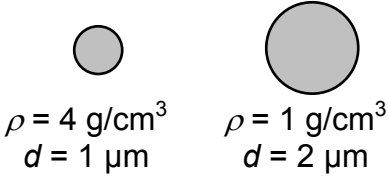
Messprinzip	Messgrössen	Messbereich	Anwendung	Beispiele von Systemen	Anmerkungen
Elektrische Mobilitätsanalyse	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen der äquivalenten Beweglichkeit	$(10^2 \dots 10^7 \text{ cm}^{-3})$ Mehrere Grössenklassen im Bereich (20 ... 1000) nm; (5 ... 200) nm	Verbrennungspartikel Primärpartikel in Atmosphäre	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS™)	Messdauer 1 bis 3 Minuten, diskontinuierlich
Elektrische Mobilitätsanalyse	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen der äquivalenten Beweglichkeit	$(10^4 \dots 10^7) \text{ cm}^{-3}$ Wenige Grössenklassen im Bereich (5 ... 200) nm	Verbrennungspartikel Primärpartikel in Atmosphäre	Electrical Diffusion Battery (EDB)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich
Elektrische Mobilitätsanalyse	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen der äquivalenten Beweglichkeit	$(10^4 \dots 10^7) \text{ cm}^{-3}$ Einzelne Grössenklassen im Bereich (5 ... 500) nm	Verbrennungspartikel Primärpartikel in Atmosphäre	Fast Mobility Particle Sizer (FMPS™)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich
Flugzeitspektrometer (time-of-flight particle spectrometer)	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen der Partikelmasse	$(10^{-3} \dots 10^3) \text{ cm}^{-3}$ Duzende Grössenklassen im Bereich (0.5 µm ... 20) µm		Aerosol particle sizer (APS™)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich
Kaskadenimpaktor	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen des aerodynamischen Durchmessers	$(10^4 \dots 10^7) \text{ cm}^{-3}$ Einzelne Grössenklassen im Bereich (20 nm ... 2) µm		Elektrischer Niederdruckimpaktor (Electrical low pressure Impactor, ELPI™)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich

Streulichtmessung	Partikelanzahlkonzentration in Grössenklassen des optischen Durchmessers	$(10^{-3} \dots 10^6) \text{ cm}^{-3}$ Einzelne Grössenklassen im Bereich (200 nm ... 20) μm	Reinraum Tröpfchen Abrieb, Staub	Optical Particle Counter (OPC)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich
Kondensationskerne Zählen	Partikelanzahlkonzentration	$<10^6 \text{ cm}^{-3}$ in 10 nm ... 2 μm		CPC auf Alkoholbasis (selten Wasserbasis)	Messdauer wenige Sekunden und kontinuierlich

Alle Messverfahren können mit entsprechender Vorbehandlung des Aerosols im Prinzip sowohl für Emissionen als auch für Immissionen eingesetzt werden.

Anhang 3: Messgrößen für den Durchmesser von Partikeln

Die folgenden Figuren zeigen schematisch Unterschiede der verschiedenen Masse für den Partikeldurchmesser.

	<p>Geometrischer Durchmesser: Bezüglich "vertikalem" Durchmesser sind die beiden Teilchen gleich gross.</p>
 <p>$n = 1.66$ $d = 41 \text{ nm}$</p> <p>$n = 1.33$ $d = 50 \text{ nm}$</p>	<p>Optischer Durchmesser²: Bezüglich Streulichtverhalten sind die beiden Teilchen infolge des unterschiedlichen Brechungsindex n gleich gross. → Optisches Partikelmessgerät</p>
 <p>$\rho_1 \neq \rho_2$</p>	<p>Beweglichkeitsdurchmesser: Bezüglich der Diffusion sind die beiden Teilchen gleich gross. → Diffusionsbatterie (EDB), elektrischer Beweglichkeitsanalysator (SMPS)</p>
 <p>$\rho = 4 \text{ g/cm}^3$ $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$</p> <p>$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ $d = 2 \text{ }\mu\text{m}$</p>	<p>Aerodynamischer Durchmesser³: Bezüglich Sedimentationsgeschwindigkeiten sind die beiden Teilchen gleich gross. → Elektrischer Niederdruckimpaktor, Flugzeitspektrometer</p>

² Brechungsindex: Wasser 1.33, Kohlenstoff 1.66. Streulichtintensität Rayleigh $I_s \propto d^6 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 3} \right)^2$

³ Sinkgeschwindigkeit nach Stokes: $v \propto \rho_p d^2$

Anhang 4: Hinweise zum Betrieb ausgewählter Messverfahren

1 Scanning Mobility Particle Analyzer SMPS

1.1 Wartungsarbeiten

Die folgenden Arbeiten sind vorzusehen (siehe auch Wiedensohler et. al., 2010)

- Regelmässige Kontrolle der Stützluft- und des Aerosolflusses mit externem Flowmeter
- Regelmässige Reinigung des Impaktors und anderer Vorabscheider
- Kontinuierliche Aufzeichnung und Validierung der Statusmessgrössen (Flüsse, Temperaturen, Drücke, Summenstatistik)
- Regelmässige Kalibrierung/Überprüfung des Analogausgangs des CPC
- Überprüfung der vom Hochspannung-Power-Supply am DMA angelegten Hochspannung
- Hersteller-Prozeduren gemäss angegebenem Intervall
- Regelmässiger Abgleich mit einem Referenzsystem
- Regelmässiges Spülen des Betriebsmittel-Reservoirs (Butanol, Wasser)
- Regelmässige Reinigung des DMA
- Jährliche Intensivwartung mit Teilzerlegung und Reinigung, Ersatz von Verschleisstteilen
- Austausch des Neutralisators gemäss Herstellerangaben

1.2 Flüsse im DMA

Es empfiehlt sich den (polydispersen) Aerosolfluss am DMA Eingang mit kalibrierten Differenzdruckmessern kontinuierlich zu überwachen. Die Schwankungen dieses Flusses innerhalb eines Tages darf nicht mehr als 5% betragen. Bei den periodisch durchgeführten Routinekontrollen muss dieser Fluss manuell überprüft werden (mit Bubble Flowmeter o.ä.). Es empfiehlt sich sicherzustellen, dass bei nicht anwesendem monodispersen Aerosolfluss am DMA Ausgang (d.h. CPC Pumpe ausschalten) auch der polydisperse Aerosolfluss gleich Null ist. Ist dies nicht der Fall, so bedeutet dies, dass der Sheathair-Fluss (Stützluft-eingang) nicht gleich dem Excessair-Fluss (Stützluftausgang) ist. Bei geschlossenen Stützluftkreisläufen ist dann ein Leck die Ursache.

Der Stützluftfluss sollte mit einem kalibrierten Differenzdruckmesser oder Massenflussmesser kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet werden. Auch dieser Fluss muss bei den Routinekontrollen manuell überprüft werden. Der Einsatz kritischer Düsen oder PID geregelter (luftdichten!) Ventilatoren hat sich in den bestehenden Systemen bewährt. Beim Einsatz einer kritischen Düse empfiehlt es sich zusätzlich den Unterdruck zwischen der Düse und der Pumpe kontinuierlich zu überwachen – für einen kritischen Betrieb der Düse muss dieser kleiner als $0.5 \times$ Atmosphärendruck sein.

Wird die Stützluft in einem geschlossenem Kreislauf betrieben, so empfiehlt sich der Einsatz eines Wärmetauschers in der Stützluft am DMA Eingang (dies verhindert den Übertrag der Pumpenwärme auf den DMA). HEPA Filter kommen unmittelbar beim Stützlufteingang und -ausgang zum Einsatz.

1.3 Lecktest

Bei den Routinekontrollen muss mit einem HEPA Filter im polydispersen Aerosol überprüft werden ob die gemessenen Anzahlgrößenverteilungen eine „Nulllinie“ zeigen. Werden trotzdem Partikel gezählt, so ist dies ein Hinweis auf ein Leck. Erscheinen die Partikel bei den grösseren Durchmessern, so kann auch eine „stille“ Entladung (Korona) im DMA dafür verantwortlich sein.

Ein weiterer Test besteht darin keine Spannung (0 V) am DMA anzulegen (ohne HEPA Filter am DMA Eingang). Auch hier sollte der CPC keine Partikel zählen. Werden trotzdem Partikel gezählt, so könnten Turbulenzen im DMA dafür verantwortlich gemacht werden (mögliche Ursache dafür: Verunreinigung der DMA-Oberflächen oder des Laminators, falsche Aerosol-zu-Stützluft Flussverhältnisse, Pulsationen im DMA verursacht durch mangelnde Dämpfung der Stützluftpumpe).

1.4 Hochspannung

Die richtige Funktionsweise des Hochspannungsgerätes muss periodisch überprüft und kalibriert werden. Erhöhte Aufmerksamkeit soll insbesondere den tieferen Spannungen (<200V) gewidmet werden.

1.5 Luftfeuchtigkeit

Wird die Stützluft (Sheath Air) nicht in einem geschlossenen Kreislauf betrieben, so muss mit einem Nafion- oder Diffusionstrockner sichergestellt werden, dass diese Luft auch trocken ist (relative Feuchte (rF) < 30 %).

Die Feuchte in der Excess-Air soll mit einem kapazitiven Sensor überwacht werden (erforderliche Genauigkeit: 5 % rF im Bereich rF = 10 % ... 80 %). Dieser Sensor sollte mindestens einmal pro Jahr kalibriert werden.

1.6 Sonstiges

Der Atmosphärendruck im DMA soll gemessen werden und für die Berechnung der Mobilitätsdurchmesser berücksichtigt werden. (ISO 15900)

Die Scan Zeit darf nicht zu schnell sein um „Verschmierungseffekte“ zu verhindern. Wird der ganze Durchmesserbereich gemessen (z.B. $d = 14 \text{ nm} \dots 800 \text{ nm}$), so empfiehlt sich eine Scanzeit von > 200 s.

Die richtige Funktionsweise des DMAs soll periodisch mit zertifiziertem monodispersen Polystyrol-Aerosol (PSL) überprüft werden.

Wird das SMPS an einem Standort betrieben, wo innerhalb eines Scans, starke Schwankungen der Aerosolkonzentration auftreten (z.B. an quellennahen Standorten), muss dem Gerät ein Puffervolumen vorgeschaltet werden. Die Verweilzeit des Aerosols in diesem Puffervolumen muss im Bereich der Scanzeit liegen und sorgt für eine Ausmittelung der hohen Konzentrationen.

1.7 Auswertung

1.7.1 Inversion:

Die vom CPC gemessenen Rohdaten werden in der Regel mit den Einheiten Counts/s als Funktion der Scanzeit abgelegt. Mit Hilfe der SMPS Hersteller Software werden diese Rohdaten in eine Anzahlgrößenverteilung ($dC/d\log(d)$ als Funktion des selektierten Durchmessers) konvertiert. Hierfür wird eine bestimmte DMA-Transferfunktion angenommen und für die „transienten“ Bedingungen während der Messung korrigiert. Es wird auch berücksichtigt, dass nur ein Bruchteil der Partikel im Neutralisator aufgeladen wird (grös-

senabhängige Aufladewahrscheinlichkeit). In der Regel kann eingestellt werden, ob die Anzahlgrößenverteilung auch für Artefakte aufgrund mehrfachgeladener Partikel korrigiert werden soll.

1.7.2 Beiträge zur Messunsicherheit:

Je kleiner die Partikel, desto grösser ist die Messunsicherheit. Dies hat zwei Gründe: 1) Nur ein kleiner Bruchteil der kleinen Partikel trägt eine Ladung und wird dadurch im DMA abgelenkt (geringe Zählstatistik). 2) Die kleinen Partikel erfahren starke Diffusionsverluste im DMA und in den Zuleitungen zum DMA (Kr Quelle). Die kommerziellen Auswertalgorithmen korrigieren in der Regel nicht für diese Verluste.

Delaytime: Für die Auswertung muss die Delaytime (Verweilzeit der Partikel zwischen DMA Ausgang und Detektion im CPC) bekannt sein. Die kommerzielle SMPS-Software erlaubt eine automatische Bestimmung dieser Delaytime. Ein Fehler in der Bestimmung der Delaytime überträgt sich unmittelbar auf einen systematischen Fehler in der Durchmesserbestimmung. Dieses Problem verschärft sich bei kurzen Scanzeiten (Weingartner et al, 2002). Deshalb ist auf eine kurze Verweilzeit der Partikel zwischen DMA und CPC zu achten.

2 Elektrischer Niederdruckimpaktor ELPI

2.1 Einsatz des Gerätes

Der Einsatz des Gerätes ist vor allem dort angebracht, wo es von Interesse ist, Informationen über die Zusammensetzung des Feinstaubes über das gesamte Spektrum von PM10 zu erhalten, sei es über die Partikelanzahlkonzentration pro Grössenklasse oder Analyse der Inhaltsstoffe.

Solange noch keine Immissionsgrenzwerte für die Partikelanzahlkonzentration bestehen, macht es wenig Sinn, die Partikelzählgeräte im Dauerbetrieb über das gesamte Jahr einzusetzen.

Praktische Einsatzmöglichkeiten sind (vorausgesetzt, dass der Lärmpegel der Vakuumpumpe toleriert wird):

- Indoor-Messungen (Raucher/Nicht-Raucher, Druckerpartikel, ...)
- Outdoor-Messungen (Immissionen, Effekt von Partikelfiltern, Aufwirbelung von Staub durch Wischmaschinen, ...)

2.2 Wartungsarbeiten

Die folgenden Arbeiten sind vorzusehen

- Service der externen Hochvakuumpumpe: nach Dauerbetrieb jährlich
- Service des Messgerätes: alle 2 Jahre, durch Hersteller
- Hochvakuumschläuche: nur nach Bedarf (Alterung, Schäden, ...)

2.3 Elektrometerkalibrierung

Eine Kalibrierung der Elektrometer durch den Bediener ist nicht vorgesehen.

Der automatisch oder manuell ausgelöste Nullabgleich wird aber verwendet, um die gemessenen Ströme mit der Elektrometerabweichung zu korrigieren. Verschiedene Elektrometerabweichungen werden durch unterschiedliche Messbedingungen wie Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit in der Messluft verursacht. Die vier Messbereiche haben auch unterschiedliche Elektrometerabweichungen.

Das Intervall für den Nullabgleich ist frei wählbar, zwischen 5 Minuten und 6 Stunden. Vor dem Nullabgleich muss das Gerät eine stabile Betriebstemperatur erreicht haben. Im Normalfall erfolgt dies nach rund einer Stunde Betrieb.

2.4 Reinigung

Die längste Standzeit wird erreicht, wenn Sintered Plates eingesetzt werden. Diese ist aber direkt abhängig von der Belastungssituation am Messort. Sie schwankt zwischen einer und vier Wochen.

Gereinigt werden müssen die Hauptelemente des ELPI:

- Corona Charger
- Impaktoren mit den Düsenplatten
- PM10 Sondenkopf

2.5 Corona Charger

Die Reinigung erfolgt gemäss Handbuch. Eine vollständige Demontage des Chargers ist nur bei sehr starker Verschmutzung notwendig. Erfahrungsgemäss reicht dies jährlich.

Die kleine Demontage mit entsprechender Reinigung der Teile ist vom Verschmutzungsgrad abhängig. Je nach belastetem Standort ist dies wöchentlich der Fall oder sobald die Spannung über 5.8 kV steigt.

Zu beachten ist, dass die Charger-Nadel auf der Spitze meist eine weisse Oxidschicht aufweist, was zu dieser Spannungserhöhung führt. Diese Schicht lässt sich am besten mit einem rauen Tuch und Alkohol entfernen.

Aufgepasst: Wolframspitze bricht sehr schnell ab!

2.6 Impaktoren und Düsenplatten

Falls „Sintered Plate Impaktoren“ verwendet werden, reicht es, wenn diese alle 14 Tage gereinigt werden oder spätestens wenn die vordefinierte Alarmschwelle der summierten Masse erreicht wird.

Die Reinigungsprozedur ist im Handbuch beschrieben. Es reicht die Impaktoren rund zwei Stunden im Ultraschallbad in einer Wasser-Alkohol-Seifenlösung zu belassen. Die Impaktoren können danach mit einem Borstenpinsel relativ einfach gereinigt werden. Um eine Rückstandsbildung beim Trocknen zu vermeiden, ist es empfehlenswert, wenn die Teile mit Pressluft ausgeblasen und getrocknet werden. Verbleibende Rückstände oder Verfärbungen sind für den Messbetrieb ohne Bedeutung.

Bei den Düsenplatten reicht es, wenn sie monatlich gereinigt werden. Zu beachten ist, dass jene Platten mit den feinen Löchern (Nr. 1 bis 7) sauber gereinigt sind (Gefahr der Verengung der Düsenlöcher).

2.7 PM10 Sondenkopf

Die Prallplatte kann monatlich gereinigt und gefettet werden. Beim Sondenkopf selbst reicht es, wenn er alle 6 Monate gereinigt wird (nach Dauerbetrieb).

2.8 Checkliste für den ELPI-Einsatz

- Unterdruckleitung zu „Nafion®-Dryer“ geöffnet
- Ölstand an Hochvakuumpumpe
- Dichtigkeitscheck nach Transport
- Überprüfung Geräteparameter:
 - Feuchtigkeit der Messluft („Nafion®-Dryer“)
 - Chargerspannung
 - Unterdruck Probennahmefluss
 - Summenparameter der gesammelten Partikelmasse
 - Gerätewarnungen

3 Kondensationskernzähler CPC

3.1 Wartungsarbeiten

Die vom Hersteller vorgeschriebenen Wartungsarbeiten und ihre Periodizität hängen vom eingesetzten Gerätetyp ab. Die notwendigen Wartungsarbeiten sind zudem vom Einsatz und der Belastung der Messgeräte abhängig. Als Basis der Wartungsarbeiten sind die Angaben der Hersteller beizuziehen, jedoch kritisch zu hinterfragen. Neuere Messgeräte zeigen sich oft wartungsärmer.

- Spülen des Butanol-Reservoirs:
Bei einigen CPC kann es vorkommen, dass an Kaltstellen im Analysenweg Wasser aus der Probenluft auskondensiert und in das Butanol-Reservoir innerhalb des CPC zurückläuft. Das entstehende Azeotrop führt zu zunehmender „Blindheit“ des Partikelzählers. Bei kontinuierlichem Betrieb mit feuchtem Aerosol ist eine Spülung des Reservoirs mindestens wöchentlich zu empfehlen.
- Prüfung auf Lecks:
Lecktests sollten mindestens jährlich durchgeführt werden.
- Filterwechsel:
Mit Ausnahme grossflächiger HEPA-Filter üblicherweise jährlich.
- Reinigung der Optik:
gemäss Vorgaben des Herstellers, im Rahmen eines Service.

3.2 Durchfluss

Der Probenahmeffluss der Messgeräte soll in regelmässigen Abständen (vorzugsweise monatlich) überprüft werden.

3.3 Effizienzkurve

Die Detektionseffizienz bei den CPC ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Kondensator und Saturator. Je höher die Temperaturdifferenz, umso tiefer die untere Detektionslimite. Bei gewissen Gerätemodellen kann die Temperaturdifferenz eingestellt werden. Diese Einstellung ist vor der Messung zu kontrollieren.

3.4 Kalibration

Es wird empfohlen die Partikelanzahlmessung auf nationale Normale zurückzuführen. Die Messpunkte (Grösse und Anzahlkonzentration) sind auf den Einsatzbereich der Messgeräte abzustimmen.

3.5 Checklisten für CPC-Einsatz

- Überprüfung Geräteparameter und Vergleich mit den Sollwerten
(optimal: Aufzeichnung der wichtigsten Gerätekenndaten über Datenerfassungen):
 - Gerätealarme
 - Temperaturen (Saturator, Kondensator, Optik etc.)
 - Druckparameter (z.B. Luftdruck, Unterdruck vor Pumpe)
 - Durchfluss (z.B. Differenzdruck über Kapillare, Pumpenleistung)
- Füllstand Kondensationsflüssigkeit
- Laufender Vergleich mit einem anderen primären Luftschadstoff
(optimal Kohlenmonoxid oder Stickstoffmonoxid)

4 Optische Partikelmessgerät

4.1 Wartungsarbeiten

Die folgenden Arbeiten sind vorzusehen:

- Regelmässiges Wechseln der EingangsfILTER im vom Hersteller vorgegebenen Intervall.
- Periodische Reinigung der Messzelle nach Angaben des Herstellers.

4.2 Durchfluss

Der Durchfluss soll bei periodischen Messungen vor und nach jedem Messeinsatz und bei kontinuierlichen Messungen mindestens einmal monatlich mit einem externen Flowmeter überprüft werden. Je nach Art der Flussregelung im Gerät dürfen nur druckfrei arbeitende Flowmeter verwendet werden.

4.3 Effizienzkurve

Optische Partikelmessgeräte (OPC) bestimmen die PNC (Anzahl Partikel pro Liter Luft) und die Partikelgrösse (Durchmesser) über die Streuung von Laser- oder Weisslicht. Die untere Detektionsgrenze ist von der verwendeten Lichtquelle abhängig und liegt typischerweise im Bereich von 100nm bis 500nm.

Das Messverfahren basiert auf der Annahme, dass sich zu jedem Zeitpunkt maximal ein Partikel in der Messzelle befindet. Der Zustand, in dem mehrere Partikel in der Messzelle sind und das Licht streuen, wird als Koinzidenz bezeichnet. Koinzidenz führt dazu, dass die Partikelanzahl unterschätzt und die Partikelgrösse überschätzt wird – indem mehrere kleine Partikel als ein grosses gezählt werden. Die maximale PNC bis zu welcher ein Gerät koinzidenzfrei messen kann, muss vom Hersteller bekannt gegeben werden. Bei Überschreiten dieser Schwelle misst das Gerät mit einer stark erhöhten Unsicherheit.

Streulichtmessgeräte haben den Vorteil, dass sie durch ihre meist geringe Baugrösse und geringe Anforderungen an die Infrastruktur am Messort sehr vielseitig und mit geringem Aufwand eingesetzt werden können. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass die untere Erfassungsgrenze bei relativ grossen Partikeldurchmessern liegt, d.h. Partikel mit geringem Durchmesser nicht quantitativ erfasst werden können.

Optische Partikelzähler bieten eine gute Möglichkeit, um rasch Informationen über die Belastung der Luft mit Partikeln über einigen 100 nm Grösse zu erhalten. Zu beachten ist, dass kleinere Partikel nicht gezählt werden und bei Überschreitung der maximal zulässigen Konzentration gemäss Hersteller mit einer vorgeschalteten Verdünnung gearbeitet werden muss.

4.4 Kalibrierung

Eine Justierung mittels Nullfilter gibt Aufschluss über mögliche Fehler des Geräts wie z.B. Undichtigkeit oder Rauschen der Signalelektronik.

Ausserdem sollten die optischen Partikelzähler jährlich überprüft werden. Einige Hersteller bieten dafür eine Vergleichsmessung mit ihren Muttergeräten an. Diese ersetzt nicht eine Kalibrierung zu einem rückverfolgbaren Normal.

Anhang 5: Auswertung von Grössenverteilungsdaten

Partikelgrössenverteilungen umfassen oft sehr viele Grössenklassen. Die Grösseninformation möchte aber in weniger genauen Grössenaufösung oder durch Verteilungsparameter beurteilt werden. Dazu müssen aus den Grössenverteilungen geeignete Auszüge gemacht werden. Im Folgenden werden die Algorithmen aufgezeigt.

Ausgangspunkt ist eine diskrete Partikelgrössenverteilung, d.h. einer Grössenverteilung bei welcher für eine Reihe von Durchmessern d_i die dazugehörige Partikelanzahlkonzentrations-Dichte (Partikelanzahlkonzentration pro logarithmische Längeneinheit)

$c_i = dC(d)_i / d \log(d)$ angegeben wird.

Meist werden die Durchmesser in einer geometrischen Reihe herausgegeben, so dass der Quotient zweier aufeinanderfolgender Durchmessern konstant ist: $d_{i+1}/d_i = d_{j+1}/d_j = \text{const.}$

Näherungsweise wird dabei angenommen, dass C_i innerhalb des Bereichs mit den Grenzen $d_{i,\min}$ und $d_{i,\max}$ konstant ist. Bei einer geometrischen Reihe können die Grenzen berechnet werden gemäss $d_{i,\min} = \sqrt{d_{i-1} \times d_i}$ und $d_{i,\max} = \sqrt{d_i \times d_{i+1}}$

Messgeräte erlauben in der Regel die Ausgabe einer Wertetabelle für d_i (nm) und c_i (cm⁻³) in der folgenden Art:

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	$i =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	d_i	19.46	20.17	20.91	21.67	22.47	23.29	24.14	25.03	25.95	26.9	27.88
2	c_i	16.84	31.39	50.29	72.95	90.12	96.38	90.52	73.36	52.06	30.94	16.14

Diese Tabelle erlaubt die Grössen der Partikelgrössenverteilung zu berechnen:

Bei der Berechnung der **Anzahlkonzentration für eine einzelne Grössenklasse C_i** ist zu beachten, dass sich die Konzentrationsdichte auf einen definierten Abschnitt mit logarithmischen Durchmesser angegeben ist:

$$C_i = c_i \times (\log(d_{i,\max}) - \log(d_{i,\min})) = c_i \times \log\left(\frac{d_{i,\max}}{d_{i,\min}}\right) = \frac{1}{2} c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \approx c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)$$

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	$i =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	d_i	19.46	20.17	20.91	21.67	22.47	23.29	24.14	25.03	25.95	26.9	27.88
2	c_i	16.84	31.39	50.29	72.95	90.12	96.38	90.52	73.36	52.06	30.94	16.14
3	C_i		0.490	0.783	1.140	1.411	1.500	1.416	1.152	0.815	0.482	

Excel Formel in B3: =0.5*(B2*LOG(C\$1/A\$1))

Zur Berechnung der **totalen Anzahlkonzentration C** sind die Konzentrationen der Grössenklassen zu summieren:

$$C = \sum_i C_i = \frac{1}{2} \sum c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \approx \sum c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) \quad C = 9.189 \text{ cm}^{-3}$$

Excel (direkte Arrayformel): {=0.5*SUMME(B2:J2*LOG(C\$1:K\$1/A\$1:I1))}

Der **Modus \hat{d}** bezeichnet das Maximum der Partikelgrössenverteilung und kann direkt der Tabelle entnommen werden ($\hat{d} = 23.30 \text{ nm}$).

Excel: =INDEX(A\$1:K\$1;0;VERGLEICH(MAX(A2:K2);A2:K2;0))

Der **geometrische Mittelwert d_g** ist der Durchmesser des geometrischen Mittels. Bei einer lognormalen Verteilung entspricht der geometrische Mittelwert dem Modus und dem Median.

$$\log(d_g) = \frac{1}{C} \sum_i C_i \times \log(d_i) = \frac{1}{2C} \sum_i c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \times \log(d_i)$$

Aus dem Zwischenergebnis für die Grössenklassen $\alpha_i = c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \times \log(d_i)$

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	$i =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	d_i	19.46	20.17	20.91	21.67	22.47	23.29	24.14	25.03	25.95	26.9	27.88
2	c_i	16.84	31.39	50.29	72.95	90.12	96.38	90.52	73.36	52.06	30.94	16.14
3	C_i		0.490	0.783	1.140	1.411	1.500	1.416	1.152	0.815	0.482	
4	α_i		1.28	2.07	3.05	3.81	4.1	3.92	3.22	2.3	1.38	

Excel Formel in B4 für α_i : =B2*LOG(C\$1/A\$1)*LOG(B\$1)

Daraus folgt aus obigen Daten als geometrischer Mittelwert $d_g = 23.30 \text{ nm}$

Excel (direkte Arrayformel, falls C in L3):

{=10^(0.5*SUMME(B2:J2*LOG(C\$1:K\$1/A\$1:I\$1)*LOG(B\$1:J\$1))/\$L3)}

Der **Median d_{50}** bezeichnet den Durchmesser, bei welchem die Hälfte der Partikel kleiner und die Hälfte grösser sind. Zur Bestimmung kann die Summenverteilungsfunktion verwendet werden, wo ersichtlich wird in welcher Grössenklasse die Mitte liegt: $d_{50} = 23.29 \text{ nm}$.

1	d_i	19.46	20.17	20.91	21.67	22.47	23.29	24.14	25.03	25.95	26.9	27.88
2	$\sum C_i$		0.490	1.273	2.413	3.824	5.324	6.74	7.892	8.707	9.189	

Die **geometrische Standardabweichung** σ_g ist ein Mass für die Breite der Verteilung.

$$\log(\sigma_g) = \sqrt{\frac{1}{C} \sum_i C_i \times (\log(d_i) - \log(d_g))^2} = \sqrt{\frac{1}{2C} \sum_i c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \times (\log(d_i) - \log(d_g))^2}$$

Aus dem Zwischenergebnis für Grössenklassen $\beta_i = c_i \times \log\left(\frac{d_{i+1}}{d_{i-1}}\right) \times (\log(d_i) - \log(d_g))^2$

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	d_i	19.46	20.17	20.91	21.67	22.47	23.29	24.14	25.03	25.95	26.9	27.88
2	c_i	16.84	31.39	50.29	72.95	90.12	96.38	90.52	73.36	52.06	30.94	16.14
3	C_i		0.490	0.783	1.140	1.411	1.500	1.416	1.152	0.815	0.482	
4	α_i		1.28	2.07	3.05	3.81	4.1	3.92	3.22	2.3	1.38	
5	β_i		0.0038	0.0034	0.0022	0.0007	0	0.0007	0.0023	0.0036	0.0038	

Excel für β_i : falls d_g in L4: =B2*LOG(C\$1/A\$1)*(LOG(B\$1-LOG(\$L4))^2)

Aus den Beispieldaten folgt für die geometrische Standardabweichung: $\sigma_g = 1.08$

Excel (direkte Arrayformel, falls C in L3 und d_g in L4):

{=10^WURZEL(0.5*SUMME((B2:J2*LOG(C\$1:K\$1/A\$1:I\$1)*(LOG(B\$1:J\$1)-LOG(\$L4))^2))/L3}}

Bibliographie

- BAFU (2001) Umweltmaterialien Nr. 140 "Feuerwerkskörper", Seiten 62ff
- Baron, P. A. and K. Willeke (2001). *Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications*, John Wiley & Sons.
- BUWAL (2004) Reihe: Vollzug Umwelt; *Empfehlungen - Immissionsmessung von Luftfremdstoffen*. Messempfehlungen; VU-5003-D
- BUWAL (1996) Reihe Vollzug Umwelt; *Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen – Emissions-Messempfehlungen vom 25. Januar 1996, Stand: Mai 2001, VU-5008-D*
- Cercl'Air (2008) Empfehlung Nr. 13: *Qualitätssicherung von Immissionsmessungen für Gase und Partikel in der Schweiz*, www.cerclair.ch
- EN 12341:1999 Luftbeschaffenheit – Ermittlung der PM10-Fraktion von Schwebstaub – Referenzmethode und Feldprüfverfahren zum Nachweis der Gleichwertigkeit von Meßverfahren und Referenzmeßmethode
- EN 14907:2005 Luftbeschaffenheit - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM2,5-Massenfraktion des Schwebstaubs
- Hinds, William C. (1989) *Aerosol Technology – Properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-08726-2
- ISO 15900 (2009) Determination of Particle Size Distribution – Differential Electrical Mobility Analysis for Aerosol Particles
- JCGM (2008) *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML, Paris, 1. Ausgabe, 2008
- Schlatter J. (2005) Memory Effect of Particles in the SMPS, *Proceedings: 9th ETH-Conference on Combustion Generated Particles 15th - 17th August 2005*
- VDI 3867: Blatt 1 (2009) *Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung – Grundlagen*
- VDI 3867: Blatt 2 (2008) *Messen von Partikeln in der Außenluft – Charakterisierung von Prüfaerosolen – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung – Kondensationspartikelzähler (CPC)*
- Von der Weiden, S.L. , Drewnick, F. and Borrmann, S. (2009) Particle Loss Calculator – a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems, *Atmos. Meas. Tech.*, Vol 2, 479-494.
<http://www.atmos-meas-tech.net/2/479/2009/amt-2-479-2009.pdf>
- Weingartner, E., Gysel M., Baltensperger U. (2002) Hygroscopicity of aerosol particles at low temperatures. 1. New low-temperature H-TDMA instrument: Setup and first applications. *Environmental Science & Technology*, Vol 36, (1), 55-62.
- Wiedensohler, A., W. Birmili, A. Nowak, A. Sonntag, K. Weinhold, M. Merkel, B. Wehner, T. Tuch, S. Pfeifer, M. Fiebig, A. M. Fjåraa, E. Asmi, K. Sellegri, H. Venzac, P. Villani, P. Laj, P. Aalto, J. A. Ogren, E. Swietlicki, P. Roldin, P. Williams, P. Quincey, C. Hüglin, R. Schmidhauser-Fierz, M. Gysel, E. Weingartner, F. Riccobono, S. Santos, C. Grüning, K. Faloon, D. Beddows, C. Monahan, A. Marioni, H.-G. Horn, L. Keck, J. Jiang, J. Scheckman, P. H. McMurry, Z. Deng, C. S. Zhao, M. Moerman, and G. d. Leeuw (2010), Particle Mobility Size Spectrometers: Harmonization of Technical Standards and Data Structure to Facilitate High Quality Long-term Observations of Atmospheric Particle Size Distributions, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, submitted.