

DIN EN 16976



Diese Norm ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 5.

ICS 13.040.20

Entwurf

Einsprüche bis 2023-06-28
Vorgesehen als Ersatz für
DIN CEN/TS 16976
(DIN SPEC 33974):2016-11

**Außenluft –
Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen
Aerosols;
Deutsche und Englische Fassung prEN 16976:2023**

Ambient air –

Determination of the particle number concentration of atmospheric aerosol;
German and English version prEN 16976:2023

Air ambient –

Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique;
Version allemande et anglaise prEN 16976:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-04-28 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an krdl@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, 40002 Düsseldorf, Postfach 10 11 39 oder VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 114 Seiten

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 16976:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 134-04-02-18 UA „Messen von Partikeln in der Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahl“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Gegenüber DIN CEN/TS 16976 (DIN SPEC 33974):2016-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Abschnitt 1: Die untere Grenze des Partikelgrößenmessbereichs wurde auf 10 nm gesetzt und ist damit identisch zu MPSS-Messungen (Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer), siehe CEN/TS 17434. In Luftqualitätsmessnetzen, in denen MPSS zur Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung eingesetzt werden, darf ein CPC für die Qualitätssicherung der MPSS-Daten eingesetzt werden;
- b) Abschnitt 3: Der Parameter „Kalibrierfaktor“ wurde eingeführt und definiert. Die Begriffe und Definitionen für die verschiedenen Volumenströme wurden überarbeitet und neu angeordnet;
- c) 5.1.2: Der Aerosoldiffusionstrockner auf Basis von Silicagel wurde ausgeschlossen, da die Diffusionsverluste bei diesem Trocknertyp zu hoch sind;
- d) 6.2: Koinzidenzkorrektur muss durchgeführt werden. Keine anderen Korrekturfaktoren dürfen angewendet werden, sofern nicht eine Korrektur des analysierten Volumenstroms erforderlich ist;
- e) 6.3: Alle Prüfungen werden bei nur einer Temperatur durchgeführt (zwischen 20 °C und 30 °C).
- f) 6.4, Tabelle 1: Die Kriterien für mehrere Leistungskenngrößen wurden geändert, die Leistungskenngröße „Kalibrierfaktor“ wurde aufgenommen;
- g) 6.5: Einige der Prüfverfahren wurden überarbeitet, ein Prüfverfahren für den Kalibrierfaktor wurde zugefügt;
- h) 7.2: Zwei Verdünnungsfaktoren sind erforderlich: einer zur Absenkung der Konzentration und einer für die Trocknung;
- i) 7.5: Das Tracergas-Verfahren zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors eines Verdünnungssystems wurde ausgeschlossen. Allgemeine Kriterien für Verdünnungssysteme wurden aufgenommen;
- j) 9.2: Die Prüfung „Bestimmung der unteren Nachweisgrenze (Cut-off)“ wurde entfernt, das Verfahren zur „Überprüfung der Anzahlkonzentration“ substanziell überarbeitet;
- k) Anhang E: Die Werte für Partikelanzahlkonzentrationen in der Außenluft wurden aktualisiert;

- l) Anhang F: Ein Beispiel für die Ausführung eines Verdünnungssystems und ein Beispiel zur Berechnung der Unsicherheit des Verdünnungsfaktors wurden zugefügt;
- m) Anhang H: Der neue Anhang "Koinzidenzkorrektur" wurde zugefügt;
- n) Anhang I: Der neue Anhang "Ergebnisse eines experimentellen Vergleichs verschiedener CPCs" wurde zugefügt.

— Leerseite —

<i>Titel de:</i>	Außenluft — Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols
<i>Titel en:</i>	Ambient air — Determination of the particle number concentration of atmospheric aerosol
<i>Titel fr:</i>	Air ambiant — Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
3.1 Aerosoleigenschaften	7
3.2 Geräteleistung	8
3.3 Volumenströme	8
4 Atmosphärisches Aerosol	9
5 Beschreibung des Verfahrens	9
5.1 Probenahme und Konditionierung	9
5.1.1 Probenahme	9
5.1.2 Trocknung	11
5.1.3 Verdünnung	11
5.2 Bestimmung der Anzahlkonzentration mit einem CPC	11
5.2.1 Kondensationswachstum	11
5.2.2 Optische Detektion	13
6 CPC-Leistungskriterien und Prüfverfahren	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Allgemeine Anforderungen an den CPC	14
6.3 Prüfbedingungen	15
6.4 Leistungskenngrößen und Leistungskriterien	15
6.5 Prüfverfahren	16
6.5.1 Kalibrierter Volumenstrom	16
6.5.2 Messbereich der Anzahlkonzentration	16
6.5.3 Nachweisgrenze für die Anzahlkonzentration	17
6.5.4 Kalibrierfaktor	17
6.5.5 Gerätespezifische Bewertung der Linearität und Steigung der Kennlinie	17
6.5.6 Nachweisempfindlichkeitskurve bei kleiner Partikelgröße	18
6.5.7 Nachweisgrenze für die obere Partikelgröße	18
6.5.8 Nullzählrate	18
6.5.9 Einstellzeit	18
6.5.10 Abhängigkeit des Volumenstroms von der Netzspannung	18
6.5.11 Genauigkeit der Kalibrierung von Temperatur- und Drucksensoren	19
6.5.12 Auswirkung von Fehlern der Netzspannung	19
7 Leistungskriterien und Prüfverfahren für Probenahme und Konditionierung	19
7.1 Allgemeine Anforderungen	19
7.2 Leistungskenngrößen und Leistungskriterien	19
7.3 Diffusionsverluste	20
7.4 Relative Luftfeuchte	20
7.5 Verdünnung	20
7.5.1 Verdünnungsfaktor	20
7.5.2 Allgemeine Kriterien für Verdünnungssysteme	21
7.6 Primärer Probenahmeverbundenstrom	21

8	Ablauf der Messung	21
8.1	Messplanung	21
8.2	Umgebungsbedingungen	21
8.3	Erstinstallation.....	21
8.4	Erstprüfungen vor Ort	22
8.5	Datenverarbeitung und Berichterstattung.....	22
9	Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Messunsicherheit.....	23
9.1	Allgemeines	23
9.2	Häufigkeit der Kalibrierungen, Überprüfungen und Wartungsmaßnahmen	23
9.2.1	Allgemeines	23
9.2.2	Wartung des CPC.....	24
9.2.3	Kalibrierung der Linearität	24
9.2.4	Überprüfung der CPC-Nullzählrate.....	24
9.2.5	Überprüfung der Anzahlkonzentration	24
9.2.6	Überprüfung des tatsächlichen Volumenstroms	25
9.2.7	Kalibrierung der Temperatur- und Drucksensoren.....	25
9.2.8	Interne Diagnostik des CPC.....	25
9.2.9	Wartung des Probenahmesystems	25
9.2.10	Feuchtesensor.....	25
9.2.11	Verdünnungsfaktor (falls gegeben).....	25
9.2.12	Dichtigkeitsprüfung.....	25
9.3	Messunsicherheit	25
9.3.1	Allgemeines	25
9.3.2	Nachweisempfindlichkeit am CPC-Plateau	26
9.3.3	Drift der CPC-Nachweisempfindlichkeit	27
9.3.4	Volumenstrommessung	27
9.3.5	Korrektur auf Normtemperatur und Normdruck	27
9.3.6	Diffusionsverluste im Probenahmesystem.....	27
9.3.7	Verdünnungsfaktor (sofern gegeben)	28
9.3.8	Berechnung der Gesamtunsicherheit	28
	Anhang A (normativ) Ermittlung der Diffusionsverluste in Probenahmeleitungen.....	29
	Anhang B (informativ) Beispiel für die Berechnung der Diffusionsverluste in einem Probenahmesystem.....	31
B.1	Beschreibung des Probenahmesystems	31
B.2	Lufteigenschaften und Diffusionskoeffizient	32
B.3	Verluste in der primären Probenahmeleitung.....	32
B.4	Gesamtverluste bei der Probenahme	33
	Anhang C (informativ) Datenberichterstattung.....	34
C.1	Motivation	34
C.2	Level 0 (annotierte Rohdaten)	35
C.3	Level 1 (zur endgültigen physikalischen Eigenschaft verarbeitete Daten, gegebenenfalls korrigiert, ursprüngliche zeitliche Auflösung)	35
C.4	Level 2 (Stundenmittelwerte, einschließlich der Streumaße)	35
	Anhang D (informativ) Berechnung der Unsicherheit (Beispiel).....	36
D.1	Allgemeines	36
D.2	CPC-Nachweisempfindlichkeit am Plateau	36
D.3	Drift der CPC-Nachweisempfindlichkeit	36
D.4	Volumenstrommessung	36
D.5	Korrektur auf Normtemperatur und Normdruck	36
D.6	Probenahmeverluste aufgrund der Diffusion zu den Wänden.....	36
D.7	Verdünnungsfaktor (falls gegeben).....	37
D.8	Berechnung der Gesamtunsicherheit	37

Anhang E (informativ) Atmosphärische Aerosole.....	38
E.1 Allgemeines	38
E.2 Beispiele für Messungen	38
Anhang F (informativ) Verdünnungssysteme.....	40
F.1 Hintergrund.....	40
F.2 Funktionsweisen von Verdünnungssystemen.....	40
F.2.1 Allgemeines	40
F.2.2 Verdünnungssystem mit Nebenstromfilter	40
F.2.3 Verdünnungssysteme mit externer Reinluftversorgung	41
F.3 Beispiel eines Verdünnungssystems zur Trocknung des Primärvolumenstroms	43
F.4 Betriebsparameter eines Verdünnungssystems.....	44
F.5 Beispiel zur Berechnung der Unsicherheit des Verdünnungsfaktors.....	46
Anhang G (informativ) Laminare Strömung.....	48
Anhang H (informativ) Koinzidenzkorrektur.....	49
Anhang I (informativ) Ergebnisse des experimentellen Vergleichs verschiedener CPCs	51
Literaturhinweise.....	56

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 16976:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird CEN/TS 16976:2016 ersetzen.

Im Vergleich zur vorherigen Ausgabe wurden die folgenden technischen Änderungen vorgenommen:

- Abschnitt 1: Die untere Grenze des Partikelgrößenmessbereichs wurde auf 10 nm gesetzt und ist damit identisch zu MPSS-Messungen (Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer), siehe CEN/TS 17434. In Luftqualitätsmessnetzen, in denen MPSS zur Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung eingesetzt werden, darf ein CPC für die Qualitätssicherung der MPSS-Daten eingesetzt werden.
- Abschnitt 3: Der Parameter „Kalibrierfaktor“ wurde eingeführt und definiert. Die Begriffe und Definitionen für die verschiedenen Volumenströme wurden überarbeitet und neu angeordnet.
- 5.1.2: Der Aerosoldiffusionstrockner auf Basis von Silicagel wurde ausgeschlossen, da die Diffusionsverluste bei diesem Trocknertyp zu hoch sind.
- 6.2: Koinzidenzkorrektur muss durchgeführt werden. Keine anderen Korrekturfaktoren dürfen angewendet werden, sofern nicht eine Korrektur des analysierten Volumenstroms erforderlich ist.
- 6.3: Alle Prüfungen werden bei nur einer Temperatur durchgeführt (zwischen 20 °C und 30 °C).
- 6.4, Tabelle 1: Die Kriterien für mehrere Leistungskenngrößen wurden geändert, die Leistungskenngröße „Kalibrierfaktor“ wurde aufgenommen.
- 6.5: Einige der Prüfverfahren wurden überarbeitet, ein Prüfverfahren für den Kalibrierfaktor wurde zugefügt.
- 7.2: Zwei Verdünnungsfaktoren sind erforderlich: einer zur Absenkung der Konzentration und einer für die Trocknung.
- 7.5: Das Tracergas-Verfahren zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors eines Verdünnungssystems wurde ausgeschlossen. Allgemeine Kriterien für Verdünnungssysteme wurden aufgenommen.
- 9.2: Die Prüfung „Bestimmung der unteren Nachweisgrenze (Cut-off)“ wurde entfernt, das Verfahren zur „Überprüfung der Anzahlkonzentration“ substanziell überarbeitet.
- Anhang E: Die Werte für Partikelanzahlkonzentrationen in der Außenluft wurden aktualisiert.
- Anhang F: Ein Beispiel für die Ausführung eines Verdünnungssystems und ein Beispiel zur Berechnung der Unsicherheit des Verdünnungsfaktors wurden zugefügt.
- Anhang H: Der neue Anhang „Koinzidenzkorrektur“ wurde zugefügt.
- Anhang I: Der neue Anhang „Ergebnisse eines experimentellen Vergleichs verschiedener CPCs“ wurde zugefügt.

Einleitung

Die Bedeutung von Aerosolpartikeln mit Durchmessern $D < 1 \mu\text{m}$ für die menschliche Gesundheit, aber auch für klimatische Effekte, wird mehr und mehr erkannt. Zur Beschreibung der Luftqualität erscheint es erforderlich, gravimetrisch ermittelte Massenkonzentrationen wie PM₁₀ oder PM_{2,5} um eine Messung der Partikelanzahlkonzentration zu ergänzen. Da ultrafeine Partikel mit Durchmessern $D < 0,1 \mu\text{m}$ nur noch unwesentlich zur Masse der atmosphärischen Aerosolpartikel beitragen, können sie am besten mit zählenden Messverfahren ausreichender Empfindlichkeit erfasst werden.

Da Partikelmessgeräte die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelanzahlgrößenverteilung ermöglichen, werden zwei Dokumente erstellt:

- eines, das sich mit der Bestimmung der Messgröße Anzahlkonzentration (ein Maß für die „gesamte“ Anzahlkonzentration, dieses Dokument) befasst;
- eines, das sich mit der Bestimmung der Anzahlkonzentration innerhalb einer beschränkten Anzahl von Größenbereichen befasst (CEN/TS 17434).

Abschnitt 5 und Abschnitt 6 enthalten allgemeine Angaben zum Verfahren und zu den erwarteten Eigenschaften des zu messenden Aerosols.

Abschnitt 7 legt Leistungskriterien für CPCs fest. Dies umfasst die relevanten Leistungskenngrößen (ohne Probenahmesystem), die zu erfüllenden Kriterien sowie die Beschreibung der entsprechenden Prüfungen. Diese Prüfungen werden im Allgemeinen von Prüfinstituten oder CPC-Herstellern, nicht jedoch von Anwendern durchgeführt und können Grundlage für eine zukünftige Typprüfung von CPCs sein.

Abschnitt 8 behandelt die Leistungskriterien und Prüfverfahren für das Probenahme- und Konditionierungssystem (z. B. Verdünnung). Diese Prüfverfahren dürfen von Herstellern von Probenahmesystemen, Prüfinstituten oder Anwendern (Netzwerkbetreibern) angewendet werden.

Abschnitt 9 behandelt die Anforderungen für die Einrichtung, Erstprüfungen und Kalibrierungen sowie den Betrieb eines CPC und Probenahmesystems an einem Messort, einschließlich routinemäßiger Wartung, Datenverarbeitung (unter Nutzung von QA/QC-Daten) und Berichterstattung. Diese Tätigkeiten liegen in der Verantwortung der Anwender (Netzwerkbetreiber), wobei Kalibrierungen, bei denen Prüfaerosole erforderlich sind, nur von entsprechend qualifizierten Laboratorien durchgeführt werden dürfen.

Abschnitt 10 behandelt die Maßnahmen zur Qualitätssicherung, d. h. die während des Betriebs des CPC und Probenahmesystems am Messort erforderlichen laufenden Prüfungen und Kalibrierungen. Diese Tätigkeiten liegen in der Verantwortung der Anwender (Netzwerkbetreiber), wobei Kalibrierungen, bei denen Prüfaerosole erforderlich sind, nur von entsprechend qualifizierten Laboratorien durchgeführt werden dürfen. In diesem Abschnitt werden auch die wesentlichen Quellen der Messunsicherheit genannt.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt ein Standardverfahren zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration in Außenluft im Bereich bis etwa 10^7 cm^{-3} für Mittelungszeiten von mindestens 1 min. Das Standardverfahren basiert auf einem im Zählmodus betriebenen Kondensationspartikelzähler (en: Condensation Particle Counter, CPC) mit geeignetem Verdünnungssystem für Konzentrationen, die den Bereich des Zählmodus überschreiten. Weiterhin werden Leistungskenngrößen und Mindestanforderungen für geeignete Geräte definiert. Die in diesem Dokument betrachteten unteren und oberen Partikelgrößen sind 10 nm bzw. einige Mikrometer. Dieses Dokument beschreibt Probenahme, Betrieb des Geräts, Datenverarbeitung und QA/QC-Maßnahmen, einschließlich der Kalibrierparameter.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 27891:2015, *Aerosol particle number concentration — Calibration of condensation particle counters*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1 Aerosoleigenschaften

3.1.1

Partikel

kleines Materieteilchen mit definierten physikalischen Grenzen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Phase eines Partikels kann fest, flüssig oder zwischen fest und flüssig und eine Mischung aus diesen Phasen sein.

[QUELLE: ISO 27891:2015, modifiziert]

3.1.2

Aerosol

Mehrphasensystem aus in einem Gas suspendierten festen und/oder flüssigen Partikeln mit einer Partikelgröße von $0,001 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$

3.1.3

Anzahlgrößenverteilung

Häufigkeitsverteilung der Partikelanzahlkonzentration, dargestellt als Funktion der Partikelgröße

3.1.4

Partikelanzahlkonzentration

Anzahl der Partikel je Trägergasvolumen

Anmerkung 1 zum Begriff: Für die exakte Angabe der Partikelanzahlkonzentration sind Angaben zum gasförmigen Zustand (Druck und Temperatur) oder der Bezug auf eine Standardvolumenangabe erforderlich.

[QUELLE: ISO 27891:2015]

3.2 Geräteleistung

3.2.1

Koinzidenzfehler

Fehler, der bei zählenden Messverfahren entsteht, wenn gleichzeitig zwei oder mehr Partikel als ein einzelnes Partikel gezählt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Koinzidenzfehler hängt mit der Partikelanzahlkonzentration, Strömungsgeschwindigkeit durch die Messzone und Größe der Messzone zusammen.

3.2.2

Nachweisempfindlichkeit

Verhältnis der mit dem Messgerät bestimmten Partikelanzahlkonzentration zur Referenzpartikelanzahlkonzentration des Aerosols am Geräteeinlass

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nachweisempfindlichkeit hängt von der Partikelgröße ab und kann von der Partikelanzahlkonzentration abhängen.

3.2.3

Kalibrierfaktor

modell- oder gerätespezifisches Verhältnis zwischen der Anzeige des Referenz-FCAE und der CPC-Zählrate, beide in Partikelanzahlkonzentrationen umgewandelt

3.3 Volumenströme

3.3.1

tatsächlicher Volumenstrom

Volumenstrom eines individuellen Messgeräts, bei tatsächlichen Luftbedingungen am Einlass gemessen

3.3.2

Nennvolumenstrom

Volumenstrom, für den ein spezifisches CPC-Modell konzipiert ist und der vom Hersteller auf dem Datenblatt des Geräts angegeben ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der tatsächliche Volumenstrom eines individuellen Geräts darf vom Nennvolumenstrom aufgrund von Herstellertoleranzen abweichen.

3.3.3

kalibrierter Volumenstrom

tatsächlicher, mit einem Kalibrierzertifikat dokumentierter Volumenstrom bei der Kalibrierung

3.3.4

analysierter Volumenstrom

für die geräteinterne Berechnung der Partikelanzahlkonzentration verwendeter Volumenstrom

4 Atmosphärisches Aerosol

Atmosphärische Aerosole sind stark von ihren lokalen und regionalen Quellen abhängig. Insbesondere die Anzahl- und Massengrößenverteilung sowie die größen aufgelöste chemische Zusammensetzung sind sehr variabel. Aerosolpartikel werden entweder direkt emittiert (Primäraerosole) oder durch Nukleation und Kondensation aus Vorläufergasen gebildet (Sekundäraerosol). Verbrennungsprozesse führen sowohl zu Primär- als auch Sekundäraerosolen.

In Bezug auf die Masse wird die direkte Emission von Aerosolpartikeln durch Meersalz, biologisches Material, Wüstenstaub und vulkanische Asche global dominiert. Diese Partikel sind im Allgemeinen größer als 1 µm. Anthropogene Emissionen in diesem Größenbereich spielen im globalen Maßstab nur eine geringe Rolle. Natürliche Aerosole im Submikrometerbereich bestehen hauptsächlich aus marinem Sulfat, biogenen organischen Stoffen und kohlenstoffhaltigen Partikeln aus Waldbränden. Anthropogene Aerosole im Submikrometerbereich sind komplexe Mischungen aus Primär- und Sekundärpartikeln, die hauptsächlich aus Sulfat, Nitrat, organischen Stoffen und elementarem Kohlenstoff bestehen.

Die Partikelanzahlkonzentrationen atmosphärischer Aerosole reichen über mehrere Größenordnungen. Während ferne marine oder freie troposphärische Aerosole Anzahlkonzentrationen von einigen Zehn oder einigen Hundert Partikeln je Kubikzentimeter aufweisen, können anthropogen beeinflusste Aerosole einige Tausend bis zu einer Million Partikel je Kubikzentimeter enthalten. Die Anzahlkonzentration des anthropogenen Aerosols über Land, insbesondere in städtischen Gebieten, wird von Partikeln im Größenbereich unter 0,1 µm dominiert. Hauptsächliche Quellen für hohe Anzahlkonzentrationen in diesem Größenbereich sind regionale Partikelneubildung und lokale Verbrennungsprozesse. Die mittleren Hintergrundkonzentrationen in einem städtischen Gebiet betragen mehrere Zehntausend Partikel je Kubikzentimeter.

Einzelheiten sind Anhang E zu finden.

5 Beschreibung des Verfahrens

5.1 Probenahme und Konditionierung

5.1.1 Probenahme

Die Messung atmosphärischer Aerosole erfordert immer eine Probenahme und den Transport der Probe zum Messgerät. In bestimmten Fällen muss die Probe bezüglich Temperatur, relativer Luftfeuchte und Partikelanzahlkonzentration konditioniert werden, um das Aerosol an die zulässigen Betriebsbedingungen des Messgeräts anzupassen.

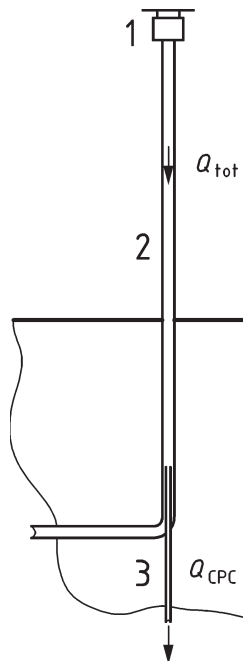
Die in diesem Dokument hierzu gemachten Angaben beziehen sich auf stationäre Messorte. Bei mobilen Anwendungen (z. B. Messungen aus Flugzeugen) sind zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen.

Die Messgeräte müssen in einer geschützten Umgebung unter kontrollierten Bedingungen (Temperatur zwischen 20 °C und 30 °C) untergebracht sein.

Der Probenahmeort ist durch die Messaufgabe bedingt. Ist das ungestörte atmosphärische Aerosol zu messen, dann sollte die Luft 5 m bis 10 m über dem Boden angesaugt werden. Gebäude, Vegetation oder Geländetopografie können auch höhere Probenahmestellen erforderlich machen. Messungen von Aerosolen in Quellnähe (z. B. Verkehr) erfordern deutlich niedriger gelegene Probenahmestellen (1,5 m bis 4 m über dem Boden, siehe Richtlinie 2008/50/EG [1]).

Der Einlass sollte so konstruiert sein, dass unabhängig von der Windrichtung eine repräsentative Probenahme für einen breiten Bereich von Windgeschwindigkeiten möglich ist. Diese Bedingung ist für die mit dem CPC gemessenen kleinen Partikel unkritisch. Die Verunreinigung der Probenahmeleitungen durch Partikel über 10 µm muss jedoch verhindert werden. Hierfür kann ein PM10- oder PM2,5-Einlass verwendet werden (siehe

Bild 1). Ein Einlass, der Partikel im Messbereich des CPC beseitigt (z. B. ein kommerzieller PM1-Einlass) darf nicht verwendet werden.



Legende

- 1 PM-Probenahmeeinlass
- 2 primäre Probenahmeleitung
- 3 sekundäre Probenahmeleitung

Bild 1 — Grundkonzept des Aerosoleinlasses

Die Probe sollte den Messgeräten idealerweise über eine vertikale primäre Probenahmeleitung ohne Krümmungen zugeführt werden. Da bei der Messung von Gasen grundlegend andere Anforderungen an die Probenahme gestellt werden, sollten Gas- und Aerosolprobenahme unabhängig voneinander erfolgen.

Um Diffusionsverluste zu verringern, muss das Aerosol mittels einer Pumpe mit einem Primärvolumenstrom (Q_{tot}) angesaugt werden, der wesentlich höher als der Sekundärvolumenstrom (Q_{CPC}) ist. Der CPC sollte die Proben isoaxial in der Mitte dieses Volumenstroms mit einer möglichst kurzen sekundären Probenahmeleitung entnehmen. In der primären Probenahmeleitung sollte die Strömung laminar sein, um zusätzliche Partikelverluste aufgrund von Turbulenzen zu vermeiden. Idealerweise ist eine Reynolds-Zahl $Re \leq 2\,000$ anzustreben (siehe 7.2).

Die Diffusionsverluste im Probenahmesystem müssen bei der kleinsten relevanten Partikelgröße von 10 nm kleiner als 25 % sein (siehe 7.2).

Der Einlass und die Leitungen müssen aus einem leitfähigen, korrosionsbeständigen Material mit geringer Oberflächenrauheit gefertigt (z. B. nicht rostender Stahl) und elektrisch geerdet sein. Dadurch werden chemische Veränderungen des Aerosols und Partikelverluste aufgrund elektrostatischer Einflüsse verhindert. Für kleine Verbindungen oder kurze Abstände dürfen auch flexible Rohrleitungen aus elektrisch leitendem Material verwendet werden. Flexible Rohrleitungen sollten kürzer als 50 cm sein.

Der Einlass und der Strömungsteiler des Probenahmesystems müssen regelmäßig auf Verunreinigungen, z. B. Insekten, überprüft und gegebenenfalls gereinigt werden.

5.1.2 Trocknung

Aerosole mit hoher relativer Luftfeuchte (im Extremfall Nebel) sollten getrocknet werden, da die Größe von Partikeln aus hygroskopischem Material durch Luftfeuchte stark beeinflusst wird. Die relative Luftfeuchte des Primärvolumenstroms am CPC-Einlass muss unter 40 % liegen (siehe 7.2). Die relative Luftfeuchte am CPC-Einlass muss überwacht werden.

Bezüglich der Temperaturbedingungen sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Liegt die Raumtemperatur über 22 °C, ist kein Aerosoltrockner erforderlich, wenn die Taupunkttemperatur der Umgebung 10 °C nicht übersteigt.
- Liegt die Taupunkttemperatur zwischen 10 °C und Raumtemperatur, muss der Sekundärvolumenstrom getrocknet werden.
- Liegt die Taupunkttemperatur über der Raumtemperatur, ist der Primärvolumenstrom vor dem Eintritt in die Räumlichkeit zu trocknen. Zusätzlich kann eine Trocknung des Sekundärstroms erforderlich sein.

Zum Trocknen des Aerosols werden zwei Verfahren empfohlen:

- Membrantrockner; vorzugsweise zur Trocknung des Sekundärvolumenstroms;
- Verdünnung mit trockener partikelfreier Luft (siehe 5.1.3); vorzugsweise zur Trocknung des Primärvolumenstroms. In diesem Fall muss das genaue Verdünnungsverhältnis bekannt sein, um korrekte Konzentrationen zu berechnen.

5.1.3 Verdünnung

Durch die Verdünnung wird entweder die Anzahlkonzentration des Außenluftaerosols in die Grenzen des CPC-Messbereichs oder die Feuchte des Aerosols verringert. In beiden Fällen kann der Verdünnungsschritt zu einer hohen Unsicherheit führen, die abgeschätzt und im Messbericht angegeben werden muss. Ist eine Verdünnung nicht unbedingt erforderlich, dann sollte dieser Schritt vermieden werden. Die Mindestanforderung an die Genauigkeit des Verdünnungsfaktors ist für beide Fälle in 7.2 angegeben.

Der für Messungen an einem bestimmten Messort gewählte CPC hat im Zählmodus vorzugsweise einen Messbereich, der die erwarteten Konzentrationen abdeckt. Ist das nicht möglich, dann muss die Probenluft mit partikelfreier Luft verdünnt werden, in diesem Fall der Sekundärvolumenstrom. Funktionsprinzipien geeigneter Verdünnungssysteme sind in Anhang F dargestellt.

Findet Verdünnung zur Trocknung des Aerosols statt, dann muss das Verdünnungssystem Teil der primären Probenahmeleitung außerhalb der klimatisierten Umgebung sein, um Wasserkondensation in jenem Teil des Probenahmesystems zu vermeiden. Ein speziell für diesen Zweck konzipiertes Probenahmesystem und seine Betriebsparameter werden in Anhang F.4 vorgestellt.

5.2 Bestimmung der Anzahlkonzentration mit einem CPC

5.2.1 Kondensationswachstum

In einem CPC werden die Partikel durch Kondensationswachstum vergrößert und anschließend optisch über eine Streulichtmessung detektiert.

Um Kondensationswachstum von Partikeln eines gegebenen Durchmessers anzuregen, ist ein bestimmtes Mindestsättigungsverhältnis bezüglich eines kondensierbaren Dampfes nach der Kelvin-Gleichung (1) erforderlich:

$$S = \exp\left(\frac{4 \cdot \sigma \cdot M}{\rho \cdot R \cdot T \cdot d}\right) \quad (1)$$

Dabei ist

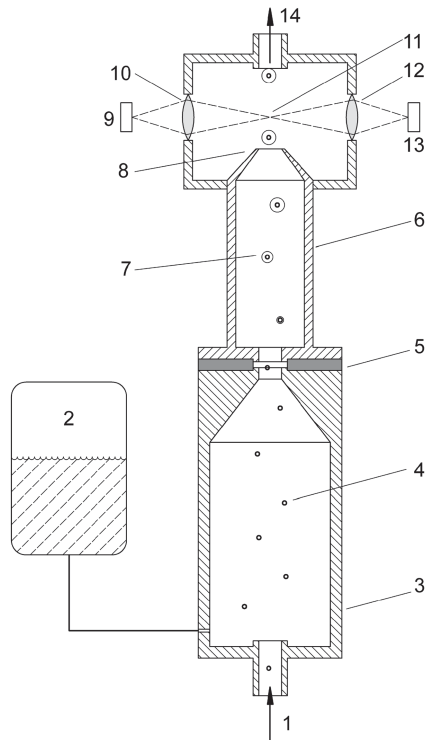
- S das Sättigungsverhältnis (Verhältnis aus aktuellem Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck);
- σ die Oberflächenspannung der Dampfsubstanz;
- M die Molmasse der Dampfsubstanz (relative Molekülmasse);
- ρ die Dichte der Dampfsubstanz im kondensierten Zustand;
- R die allgemeine Gaskonstante;
- T die absolute Temperatur;
- d der Kelvin-Äquivalentdurchmesser.

Partikelform, Oberflächenstruktur und Affinität des Partikelmaterials gegenüber der Dampfphase sind Faktoren, die den Kelvin-Äquivalentdurchmesser beeinflussen.

ANMERKUNG Der Kelvin-Äquivalentdurchmesser (bezogen auf die Dampfsubstanz) eines Aerosolpartikels ist definiert als derjenige Durchmesser eines Tröpfchens der reinen Dampfsubstanz, der bei der gleichen Übersättigung zu wachsen beginnen würde wie das betreffende Partikel.

Bild 2 zeigt das Prinzip eines CPC mit kontinuierlichem Volumenstrom. Das Aerosol gelangt in einen beheizten Sättiger (3), in dem es bei konstanter Temperatur mit der Dampfsubstanz gesättigt wird. In CPCs werden üblicherweise Alkohole als Dampfsubstanz verwendet, z. B. n-Butanol. Anschließend strömt das Aerosol in eine gekühlte Kondensationsstrecke (6), in der der Dampf an den Partikeln kondensiert und sphärische Tröpfchen bildet, die hauptsächlich aus der Dampfsubstanz bestehen und einen Durchmesser von wenigen Mikrometern haben. Diese Partikel können leicht nachgewiesen und optisch gezählt werden.

Die Sättiger- und Kondensationsstreckentemperatur sind Betriebsparameter, die die kleinste nachweisbare Partikelgröße beeinflussen.



Legende

- 1 Aerosoleinlass
- 2 Dampfsubstanzreservoir
- 3 beheizter Sättiger
- 4 Nanopartikel (nicht maßstabsgerecht)
- 5 thermoelektrische Kühl- und Heizeinrichtung
- 6 Kondensationsstrecke
- 7 Tröpfchen (nicht maßstabsgerecht)
- 8 Düse
- 9 Lichtquelle
- 10 Beleuchtungsoptik
- 11 Messvolumen
- 12 Empfangsoptik
- 13 Photodetektor
- 14 Aerosolauslass

Bild 2 — Prinzip eines CPC mit kontinuierlichem Volumenstrom (vgl. ISO 27891)

5.2.2 Optische Detektion

Das durch den Kondensationsvorgang gebildete Tröpfchenaerosol wird über die Düse (8) durch das Messvolumen des Geräts geführt, in dem die Tröpfchen mit einem Lichtstrahl beleuchtet werden. Das von den Tröpfchen gestreute Licht wird von der Empfangsoptik (12) in einem definierten festen Winkel (Empfangs-apertur) gesammelt und auf einen Photodetektor (13) (z. B. Photodiode) geleitet.

Das Messvolumen ist in den meisten Geräten definiert durch die Schnittstelle zwischen Aerosolstrom und Lichtstrahl („Full-flow-Gerät“). Um ein sehr kleines Messvolumen zu realisieren, werden die Tröpfchen in einigen Modellen jedoch nicht im gesamten Querschnitt des Aerosolstroms gezählt, sondern es wird ein kleineres Messvolumen innerhalb des Aerosolstroms durch eine spezielle optischen Anordnung mit Blenden sowohl in der Beleuchtungs- als auch der Empfangsoptik eingegrenzt. Der analysierte Volumenstrom ist bei diesem Gerätetyp kleiner als der tatsächliche Volumenstrom am Einlass, da die Tröpfchen lediglich in einem Teil des tatsächlichen Volumenstroms gezählt werden. Der analysierte Volumenstrom muss in diesem Fall aus

den Dimensionen des Messvolumens und der Geschwindigkeit des Aerosolstroms innerhalb des Messvolumens bestimmt werden.

Wenn die Partikelanzahlkonzentration ausreichend gering ist, kreuzen die Tröpfchen den Lichtstrahl nacheinander und erzeugen einzelne elektrische Impulse im Detektor. Aus der Zählrate dieser Impulse und dem analysierten Volumenstrom kann die Gesamtanzahlkonzentration der Tröpfchen bestimmt werden. Falls keine Transportverluste bei den Tröpfchen stattfinden, entspricht diese Anzahlkonzentration derjenigen der Primärpartikel (Kondensationskerne), die größer als der im Messgerät durch Übersättigung erreichte Kelvin-Äquivalentdurchmesser sind.

Bei höheren Partikelanzahlkonzentrationen können mehrere Partikel gleichzeitig im Messvolumen vorhanden sein (Koinzidenz). Das führt zum Koinzidenzfehler, der einen Messwert ergibt, der kleiner als die tatsächliche Konzentration ist. Der Koinzidenzfehler kann statistisch beschrieben und innerhalb bestimmter Grenzen korrigiert werden (siehe Anhang H).

Bei noch höheren Konzentrationen kann der Detektor keine Einzelimpulse mehr unterscheiden, sondern er misst das gestreute Licht aller im Messvolumen enthaltenen Partikel als Analogsignal (photometrischer Modus). Da das Tröpfchenwachstum durch Kondensation unabhängig von der Größe der Kondensationskerne im Idealfall zu gleicher Größe führt und da die optischen Eigenschaften der Tröpfchen im Wesentlichen durch das kondensierende Material bestimmt werden, ist der Zusammenhang zwischen diesem Photometersignal und der Partikelanzahlkonzentration im Prinzip linear und kann über eine Kalibrierung bestimmt werden. Andererseits bewirken sehr hohe Partikelanzahlkonzentrationen infolge des Kondensationsvorgangs eine Verringerung der Dampfkonzentration. Das führt nicht nur zu einer Nichtlinearität der Kalibrierkurve, sondern hat auch Einfluss auf die untere Nachweisgrenze für die Partikelgröße.

Beim Standardverfahren ist der photometrische Modus nicht zulässig.

6 CPC-Leistungskriterien und Prüfverfahren

6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Leistungskriterien für den CPC festgelegt. Die in 6.3 beschriebenen Prüfungen werden im Allgemeinen von Prüfinstituten oder CPC-Herstellern zur Validierung eines Gerätetyps durchgeführt; sie können als Grundlage für zukünftige Typprüfungen von CPCs dienen.

6.2 Allgemeine Anforderungen an den CPC

- 1) Die Leistungskriterien beziehen sich alle auf den Zählmodus des CPC.
- 2) Koinzidenzkorrektur und Kalibrierfaktor müssen angewendet werden.
- 3) Der CPC darf nicht über interne Strömungsteilung, die einer externen Überprüfung des Volumenstroms nicht zugänglich ist, oder interne Verdünnung verfügen, um unnötige Quellen der Messunsicherheit zu vermeiden.
- 4) Das Arbeitsmedium muss n-Butanol sein.

ANMERKUNG Ausreichende Daten aus Langzeitstudien in Außenluft für andere Arbeitsmedien stehen aktuell nicht zur Verfügung.

- 5) Das Gerät muss über einen Berichtszeitraum von 1 min gemittelte Konzentrationsdaten erzeugen.
- 6) Die geräteinterne Uhr muss extern synchronisierbar sein.

- 7) Das Gerät muss die folgenden Parameter in 1-Minuten-Abständen aufzeichnen können:
- Datum, Startzeit und Endzeit jeder angegebenen Konzentration,
 - Analysierter Volumenstrom,
 - Rohkonzentration (Zählrate dividiert durch den analysierten Volumenstrom), in cm^{-3} ,
 - intern koinzidenzkorrigierte Konzentration (basierend auf dem analysierten Volumenstrom), in cm^{-3} ,
 - Sättigertemperatur, in K,
 - Kondensationsstreckentemperatur, in K,
 - Temperatur und absoluter Druck an der Stelle der Volumenstrommessung,
 - Warn- und Fehlermeldungen:
 - Signalqualität außerhalb der Toleranz,
 - den Einzelzählbereich übersteigende Konzentration,
 - Strömungsprobleme,
 - Sättiger- oder Kondensationsstreckentemperatur außerhalb des Bereichs,
 - Butanol-Füllstand zu niedrig,
 - Störung der Lichtquelle.

6.3 Prüfbedingungen

Bei Inbetriebnahme des CPC muss die Bedienungsanleitung des Herstellers befolgt werden, insbesondere hinsichtlich Geräteaufstellung, Qualität und Quantität des erforderlichen Verbrauchsmaterials und Aufwärmzeit des CPC.

Bei den Laborprüfungen für die einzelnen Leistungskenngrößen muss die Temperatur der Umgebungsluft des Geräts zwischen 20 °C bis 30 °C liegen.

6.4 Leistungskenngrößen und Leistungskriterien

In Tabelle 1 sind die Leistungskriterien für den CPC angegeben, die bei den Leistungsprüfungen nach 6.5 eingehalten werden müssen.

Tabelle 1 — Leistungskriterien eines CPC

	Leistungskenngröße	Kriterien	Abschnitt
1	Kalibrierter Volumenstrom	$\leq 10 \%$ Abweichung vom Nennvolumenstrom	6.5.1
2	Messbereich der Anzahlkonzentration: Untere Grenze Obere Grenze	$\leq 100 \text{ cm}^{-3}$ (mindestens 1 500 Partikelzählungen) $\geq 10\,000 \text{ cm}^{-3}$ (einschließlich Koinzidenzkorrektur)	6.5.2

	Leistungskenngröße	Kriterien	Abschnitt
	Dynamischer Bereich	mindestens 3 Größenordnungen	
3	Nachweisgrenze für die Anzahlkonzentration	< untere Grenze des Messbereiches für die Anzahlkonzentration	6.5.3
4	Kalibrierfaktor	$1,0 < k < 1,1$	6.5.4
5	Kennlinie: Steigung Linearität	$1 \pm 0,05$ (nach Anwendung des Kalibrierfaktors) alle Residuen < 4 % des Messwerts	6.5.5
6	Nachweisempfindlichkeit bei kleiner Partikelgröße	$D_{50} = (10 \pm 1,0) \text{ nm}$ $D_{90} < 20 \text{ nm}$	6.5.6
7	Nachweisempfindlichkeit bei mittleren Partikelgrößen	> 95 % bei $(40 \pm 10) \text{ nm}$	6.5.5
8	Nachweisgrenze für die obere Partikelgröße	> 90 % Nachweisempfindlichkeit bei $(1\,000 \pm 100) \text{ nm}$	6.5.7
9	Nullzählrate	$< 1 \text{ min}^{-1}$	6.5.8
10	Einstellzeit	$t_{\text{rise}} < 5 \text{ s}$ $t_{\text{fall}} < 5 \text{ s}$ $\left \frac{t_{\text{rise}} - t_{\text{fall}}}{t_{\text{rise}}} \right < 10 \% \text{ oder } < 0,5 \text{ s}$	6.5.9
11	Abhängigkeit des Volumenstroms von der Netzspannung	$\leq 5 \%$	6.5.10
12	Kalibrierengenauigkeit der Temperatur- und Drucksensoren	$T \leq 3 \text{ K}$ $p \leq 1 \text{ kPa}$	6.5.11
13	Auswirkung des Ausfalls der Netzspannung	Die Geräteparameter müssen gegen Verlust gesichert sein. Bei Wiederkehr der Netzspannung muss das Gerät automatisch seine Funktion wieder aufnehmen.	6.5.12

6.5 Prüfverfahren

6.5.1 Kalibrierter Volumenstrom

Der kalibrierte Volumenstrom muss mit einem kalibrierten Referenzdurchflussmesser bei Atmosphärendruck gemessen werden.

Der Referenzdurchflussmesser muss bei kontrolliertem Volumenstrom mit einer Genauigkeit von $\leq 2 \%$ messen. Mindestens 10 aufeinanderfolgende Messungen sind durchzuführen. Der Mittelwert der Messergebnisse muss mit dem Nennvolumenstrom verglichen werden und die relative Differenz muss das Kriterium in Tabelle 1 erfüllen.

6.5.2 Messbereich der Anzahlkonzentration

Das Messgerät muss den in Tabelle 1 angegebenen Bereich im Zählmodus (mit oder ohne Koinzidenzkorrektur) nachweislich abdecken.

6.5.3 Nachweisgrenze für die Anzahlkonzentration

Die Nachweisgrenze für die Anzahlkonzentration ist der Wert, der mit einer statistischen Sicherheit von 95 % aus der auf Basis der Nullzählrate des Messgeräts angegebenen Konzentration unterschieden werden kann. Die Nullzählrate gibt die Anzahl der angezeigten Zählereignisse je Zeiteinheit an, die nicht durch Partikel verursacht werden. Die Nachweisgrenze muss unterhalb der in Tabelle 1 angegebenen unteren Grenze des Messbereichs der Anzahlkonzentration liegen.

6.5.4 Kalibrierfaktor

Der Vergleich der mit einem CPC gemessenen Partikelanzahlkonzentration und der aus dem Strom eines kalibrierten Faraday-Cup-Aerosol-Elektrometers (FCAE) ermittelten (für mehrfach geladene Partikel korrigierten) Referenzanzahlkonzentration kann um 5 % bis 10 % zu niedrige CPC-Partikelanzahlkonzentrationen ergeben. Dies muss durch einen modell- oder gerätespezifischen Kalibrierfaktor für die mit dem CPC gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen korrigiert werden. Ein modellspezifischer Kalibrierfaktor, der den in Tabelle 1 angegebenen Bereich nicht übersteigen darf, wird in der Gerätedokumentation des Herstellers angegeben. Ein gerätespezifischer Kalibrierfaktor muss entsprechend dem in 6.5.5 festgelegten Linearitätstest bestimmt werden.

6.5.5 Gerätespezifische Bewertung der Linearität und Steigung der Kennlinie

Die Linearität der Kennlinie wird bestimmt, indem die mit dem zu prüfenden CPC und die mit dem Referenzmessgerät bei verschiedenen Partikelanzahlkonzentrationen bestimmten Messwerte verglichen werden. Dies muss erfolgen, bevor der CPC erstmalig an einem Messort aufgestellt wird und weiterhin in den unten festgelegten Intervallen.

Als Referenzmessgerät kann ein FCAE oder CPC eingesetzt werden. Dieses Referenzmessgerät muss die Anforderungen von ISO 27891:2015 erfüllen und es muss rückführbar gegen ein primäres (d. h. ein an einem nationalen Metrologieinstitut kalibriertes) FCAE oder gegen einen primären (d. h. gegen ein primäres FCAE kalibrierten) CPC kalibriert sein.

Ein Referenz-CPC muss mindestens einmal jährlich neu kalibriert werden, aber auch nach Wartung und Reparatur. Für Referenz-CPCs mit häufiger Anwendung wird ein kürzerer Kalibrierzeitraum von 3 Monaten oder weniger empfohlen.

Ein (üblicherweise im Labor betriebenes) Referenzgerät kann zur Kalibrierung eines Transferstandard-CPCs für Prüfungen der Partikelanzahlkonzentration im Feld (siehe 9.2.5) eingesetzt werden.

Nach dem in ISO 27891:2015 zur Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit festgelegten Verfahren (ISO 27891:2015, Abschnitt 6 für ein FCAE, ISO 27891:2015, Abschnitt 7 für einen CPC als Referenzgerät) wird die Geräte Kennlinie mit 40 nm großen, mit dem Verdampfungs-/Kondensationsverfahren erzeugten Silberpartikeln für Partikelanzahlkonzentrationen von etwa 1 000 cm⁻³, 2 000 cm⁻³, 4 000 cm⁻³, 8 000 cm⁻³, 12 000 cm⁻³, 25 000 cm⁻³ und 50 000 cm⁻³ ermittelt. Die Anzeigewerte der Anzahlkonzentration müssen kalibrierfaktor- und koinzidenzkorrigiert sein.

Wenn ein Aerosolelektrometer als Referenzgerät verwendet wird und mehrfach geladene Partikel vorhanden sind, müssen Korrekturen nach ISO 27891:2015 durchgeführt werden. Nach ISO 27891:2015 muss der Anteil an mehrfach geladenen Partikeln in diesem Fall kleiner als 10 % sein.

Mit der Anzahlkonzentration des zu prüfenden CPC, berechnet mit Hilfe des tatsächlichen Volumenstroms als Funktion der Anzahlkonzentration des Referenzgeräts, ist eine durch den Nullpunkt gezwungene lineare Regressionsanalyse der kleinsten Quadrate durchzuführen. Das Ergebnis muss grafisch dargestellt werden (Referenzgerät auf der x-Achse, logarithmische x- und y-Achse). Die Steigung und die aus der Regressionsanalyse resultierenden Residuen müssen die in Tabelle 1 angegebenen Kriterien erfüllen.

Wenn die Steigung das in Tabelle 1 angegebene Kriterium erfüllt, kann der Anwender entscheiden, ob er diese berechnete Steigung als (a) „Test bestanden“ wertet, d. h. keine zusätzliche Korrektur zu dem nach 6.5.5 ermittelten modellspezifischen Korrekturfaktor vornimmt, oder (b) zur Ermittlung eines neuen Kalibrierfaktor verwendet.

Falls die Steigung das in Tabelle 1 angegebene Kriterium nicht erfüllt, sind die Gründe hierfür zu ermitteln. Beispielsweise muss das Gerät gereinigt oder der Volumenstrom justiert werden oder es müssen andere Wartungsarbeiten durchgeführt werden.

6.5.6 Nachweisempfindlichkeitskurve bei kleiner Partikelgröße

Die Nachweisempfindlichkeit ist nach ISO 27891:2015 mit nach dem Verdampfungs-/Kondensationsverfahren erzeugten Silberpartikeln und einer Partikelanzahlkonzentration zwischen $1\,000\text{ cm}^{-3}$ und $3\,000\text{ cm}^{-3}$ für folgende Partikelgrößen zu messen: 7 nm, 9 nm, 10 nm, 11 nm, 14 nm, 20 nm, 30 nm und 40 nm.

Die Nachweisempfindlichkeiten müssen die Kriterien von Tabelle 1 erfüllen.

6.5.7 Nachweisgrenze für die obere Partikelgröße

Die Nachweisempfindlichkeit ist bei $(1\,000 \pm 100)$ nm zu bestimmen und es muss nachgewiesen werden, dass die Anforderungen von Tabelle 1 erfüllt sind. Dafür ist jeder begründete Nachweis zulässig (z. B. Vergleichsmessung, theoretische Überlegungen).

ANMERKUNG Die Nachweisempfindlichkeit kann mit einem monodispersen Prüfaerosol (z. B. PSL, DEHS), dessen Partikeldurchmesser im geforderten Partikelgrößenbereich liegt, bestimmt werden, indem das Gerätesignal mit dem Signal eines Referenzgeräts (z. B. optischer Partikelzähler, Flugzeit-Spektrometer) verglichen wird.

6.5.8 Nullzählrate

Bei der Prüfung der Nullzählrate wird der CPC für mindestens 60 min betrieben, wobei am Einlass ein ULPA-Filter angebracht ist. Die Nullzählrate muss die Anforderung von Tabelle 1 erfüllen.

6.5.9 Einstellzeit

Die Einstellzeit des Geräts wird bestimmt, indem ein Sprung der Partikelanzahlkonzentration von unter 20 % auf etwa 80 % des Gerätemessbereichs erzeugt wird. Die Konzentration muss mit Hilfe eines geeigneten Ventils praktisch verzögerungsfrei verändert werden.

Ein Zyklus besteht aus dem Sprung auf die höhere Konzentration zum Zeitpunkt $t = 0$, der Wartezeit, bis sich das Signal stabilisiert ($< 2\%$ Änderung innerhalb von 1 min), dem Sprung auf die niedrige Konzentration und der Wartezeit, bis sich die Konzentration wieder stabilisiert. Der Zyklus wird vier Mal wiederholt. Die Einstellzeit (Anstieg) entspricht der Zeit, in der das Signal von 10 % auf 90 % der Differenz der stabilen Werte ansteigt; die Einstellzeit (Abfall) entspricht der Zeit, in der das Signal von 90 % auf 10 % der Differenz der stabilen Werte abfällt.

Die Ergebnisse für die Einstellzeit (Anstieg), Einstellzeit (Abfall) und deren Differenz müssen die in Tabelle 1 angegebenen Kriterien erfüllen.

6.5.10 Abhängigkeit des Volumenstroms von der Netzspannung

Die Abhängigkeit des Volumenstroms von der Netzspannung des CPC und, sofern verwendet, der Netzspannung einer externen Pumpe ist durch Messung des Volumenstroms bei 210 V, 230 V und 245 V zu ermitteln.

Die Ergebnisse müssen die in Tabelle 1 angegebenen Kriterien erfüllen.

6.5.11 Genauigkeit der Kalibrierung von Temperatur- und Drucksensoren

Die Temperatur- und Drucksensoren zur Korrektur der Probenvolumina auf Normtemperatur und Normdruck sind mit einem geeigneten Verfahren zu kalibrieren, sodass die in Tabelle 1 angegebenen Kriterien eingehalten werden.

6.5.12 Auswirkung von Fehlern der Netzspannung

Das Gerät muss auf Auswirkungen temporärer Netzspannungsausfälle überprüft werden. Die Anforderungen nach Tabelle 1 müssen eingehalten werden.

7 Leistungskriterien und Prüfverfahren für Probenahme und Konditionierung

7.1 Allgemeine Anforderungen

Die Probenahme- und Konditionierungseinrichtung entnimmt eine Probe des Aerosols aus der Außenluft und transportiert sie zum Messgerät. Außerdem muss sie Temperatur und Feuchte des Aerosols ändern können, um es an den für die Messung geeigneten Bereich anzupassen. Bei hohen Konzentrationen muss es das Aerosol mit einem festgelegten Faktor verdünnen können. Dabei darf die Größenverteilung des Aerosols nicht signifikant verändert werden.

Die folgenden Probenahmeparameter müssen aufgezeichnet werden, sofern sie nicht im CPC-Datenprotokoll berücksichtigt werden:

- relative Luftfeuchte, Temperatur und absoluter Druck am CPC-Einlass;
- Trocknung (ja/nein), falls ja: Primär- oder Sekundärvolumenstrom;
- Trocknungsverfahren (siehe 5.1.2);
- Verdünnung (ja/nein), falls ja: Verdünnungsfaktor;
- Verdünnungsverfahren (siehe 5.1.3);
- Status der Primärvolumenstrompumpe: Fehlermeldungen bei Fehlfunktion.

7.2 Leistungskenngrößen und Leistungskriterien

In Tabelle 2 sind die Leistungskriterien für die Probenahmeeinrichtung aufgelistet, die bei den in 7.3 bis 7.5 festgelegten Leistungsprüfungen eingehalten werden müssen.

Tabelle 2 — Leistungskriterien für die Probenahmeeinrichtung

	Leistungskenngröße	Kriterium	Abschnitt
1	Diffusionsverluste für die kleinste relevante Partikelgröße von 10 nm	< 25 %	7.3
2	Relative Feuchte des Sekundärvolumenstroms am CPC-Einlass	< 40 %, Genauigkeit: ± 3 %	7.4
3	Verdünnungsfaktor zur Verringerung der Konzentration	falls gegeben, Genauigkeit: ± 5 %, zeitlich stabil	7.5.1
4	Verdünnungsfaktor zur Trocknung	falls gegeben, Genauigkeit: ± 5 %, zeitlich stabil	7.5.1

	Leistungskenngröße	Kriterium	Abschnitt
4	Primärvolumenstrom	laminar ($Re \leq 2\,000$), Genauigkeit: $\pm 10\%$ des Nennwerts	7.6

7.3 Diffusionsverluste

Bei Leitungen mit einfacher Geometrie dürfen die Diffusionsverluste theoretisch berechnet werden (siehe Anhang A). Bei Strömungsgeometrien, bei denen die theoretischen Beziehungen nicht gelten (z. B. Trockner oder Verdünnungssysteme), müssen die Diffusionsverluste experimentell ermittelt werden. Außerdem dürfen veröffentlichte (begutachtete) Daten für die betreffenden Geometrien verwendet werden.

7.4 Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte am CPC-Einlass muss überwacht werden. Sie muss die Anforderung nach Tabelle 2 einhalten, auch unter Berücksichtigung des maximalen Fehlers des Messgeräts.

Der Sensor zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte ist nach einem geeigneten Verfahren zu kalibrieren, sodass die Werte der relativen Luftfeuchte zwischen 20 % und 80 % innerhalb von 3 % korrekt sind.

7.5 Verdünnung

7.5.1 Verdünnungsfaktor

Verdünnung bedeutet, die Anzahlkonzentration des Aerosols durch Mischen des Aerosolstroms Q_a mit einem partikelfreien Verdünnungsluftstrom Q_d zu verringern. Die Verdünnungsluft kann von außen zugeführt oder intern durch Filtration eines Teils der Probe erzeugt werden. Einzelheiten sind in Anhang F angegeben.

Der Verdünnungsfaktor F_d eines Verdünnungssystems ist zu bestimmen durch Messung der Volumenströme des Aerosols und entweder der Verdünnungsluft oder des gesamten Luftstroms Q_t (beide auf Normbedingungen korrigiert, falls erforderlich) und Berechnung der folgenden Verhältnisse:

$$F_d = \frac{Q_a + Q_d}{Q_a} \quad (2)$$

oder

$$F_d = \frac{Q_t}{Q_a} \quad (3)$$

Falls der Aerosolstrom nicht direkt gemessen werden kann, ist er aus der Differenz des gesamten Luftstroms Q_t und des Verdünnungsluftstroms Q_d zu bestimmen. In diesem Fall ist der Verdünnungsfaktor

$$F_d = \frac{Q_t}{Q_t - Q_d} \quad (4)$$

Bei großen Verdünnungsfaktoren ist die Differenz $Q_t - Q_d$ klein, d. h., die Unsicherheit der Messung von Q_t und Q_d kann zu einer ziemlich großen Unsicherheit des Verdünnungsfaktors führen (siehe Anhang F.4 mit einer detaillierten Unsicherheitsberechnung).

Bei der oben genannten Definition des Verdünnungsfaktors sind Partikelverluste im Verdünnungssystem nicht eingerechnet, da sie von der Partikelgröße abhängig sind. Sie müssen separat bestimmt und in die gesamten Diffusionsverluste des Probenahmesystems eingerechnet werden.

7.5.2 Allgemeine Kriterien für Verdünnungssysteme

Die Kriterien für Verdünnungssysteme sind:

- Der am Auslass der Verdünnungsstufe zur Verfügung stehende Aerosolvolumenstrom muss mit dem Einlassvolumenstrom des CPC kompatibel oder im Falle der Verdünnung gleich dem Primärvolumenstrom sein.
- Partikelverluste durch Diffusion (siehe Anhang A) müssen minimal sein.
- Die den Status des Verdünnungssystems anzeigenden Betriebsparameter (z. B. Volumenströme, Druckabfälle) sollten überwacht werden.
- Die Partikelanzahlkonzentration in der Verdünnungsluft muss kleiner als 1 cm^{-3} sein.
- Zur Trocknung muss die Taupunkttemperatur der Verdünnungsluft -20 °C oder niedriger sein.

7.6 Primärer Probenahmevolumenstrom

Laminare Strömung kann durch Berechnung der Reynolds-Zahl nach Anhang G mit Hilfe des Nennvolumenstroms und des Innendurchmessers der primären Probenahmeleitung belegt werden.

Der Primärvolumenstrom muss mit einem Durchflussmesser einer Genauigkeit besser als $\pm 5 \%$ gemessen werden.

8 Ablauf der Messung

8.1 Messplanung

Bevor ein CPC und ein Probenahmesystem für eine bestimmte Messaufgabe ausgewählt werden, muss zunächst deren Eignung für die spezifischen Bedingungen an dem betreffenden Messort beurteilt werden.

Zur Beurteilung wird eine Probemessung oder eine Schätzung der zu erwartenden maximalen Partikelanzahlkonzentrationen (betrifft mögliche Anforderungen an Koinzidenzkorrektur und Verdünnung) und hoher Werte der Taupunkttemperatur (betrifft die Konstruktion des Probenahmesystems) durchgeführt.

Die Anforderungen bezüglich Trocknung (siehe 5.1.2 und 7.2) und Verdünnung (siehe 5.1.3 und 7.2) sind zu beachten.

8.2 Umgebungsbedingungen

Der CPC muss sich in einer geschützten Umgebung befinden, die gegen Staub, Regen, Schnee, direkte Sonneneinstrahlung und andere Wärme- und Kältequellen abgeschirmt ist (Temperaturanforderungen siehe 5.1.1).

8.3 Erstinstallation

Der gewählte CPC und das Probenahmesystem sind in einer Messstation so zu installieren, dass sie ohne Beeinträchtigung betrieben werden können. Nach Installation in der Messstation ist der ordnungsgemäße Betrieb des CPC und des Probenahmesystems zu überprüfen.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen müssen den vom Hersteller des CPC und des Probenahmesystems festgelegten Anforderungen und Einschränkungen sowie den Festlegungen dieses Dokuments entsprechen. Die Einhaltung der Anforderungen des Herstellers und dieses Dokuments ist zu dokumentieren.

Werden die von einem CPC gemessenen Konzentrationen mit einem Datenlogger/Computersystem erfasst, dann ist die korrekte Funktion der Datenerfassung zu überprüfen. Werden die Messdaten an ein zentrales Computersystem übertragen, ist auch die Datenübertragung zu überprüfen. Die Überprüfungen müssen sicherstellen, dass das Datenerfassungssystem die gemessenen Konzentrationen korrekt aufgezeichnet.

Bei jedem Bauteilwechsel der Datenerfassung/Datenübertragung muss die ordnungsgemäße Funktion des gesamten Prozesses erneut überprüft werden.

Alle Überprüfungen auf ordnungsgemäße Funktion der Datenerfassungs-/Datenübertragungssysteme sind zu dokumentieren.

Zudem sind die QA/QC-Maßnahmen für die laufende Überwachung zu beachten (siehe Abschnitt 9).

8.4 Erstprüfungen vor Ort

In Tabelle 3 sind die Erstprüfungen vor Ort aufgelistet.

Tabelle 3 — Erstprüfungen vor Ort

Überprüfungen	Abschnitt	Bemerkungen
CPC		
Nullzählung	9.2.5	
Anzahlkonzentrationsmessung	9.2.6	Kann bereits im Labor vor dem Transport zur Messstelle durchgeführt werden.
Kalibrierung des Volumenstroms	9.2.7	
Status der internen Fehlerdiagnose		Überprüfung, dass keine internen Fehlermerker gesetzt werden.
Probenahmesystem		
Primärer Probenahmevolumenstrom	7.6	
Verdünnungsfaktor (falls gegeben)	9.2.12	
Dichtigkeitsprüfung	9.2.13	

8.5 Datenverarbeitung und Berichterstattung

Koinzidenzkorrekturen dürfen vom Kondensationspartikelzähler direkt vorgenommen werden oder müssen vom Anwender vor der Berichterstattung durchgeführt werden. Bevor die Daten an die Datenbank übermittelt werden, wird empfohlen, eine manuelle Qualitätsüberprüfung der Daten vorzunehmen.

Es müssen mindestens Angaben zur Temperatur am Geräteeinlass sowie zu Druck und Luftfeuchte mit der gleichen Zeitauflösung wie bei den Daten der Anzahlkonzentration gemacht werden. Die Angabe weiterer Betriebsparameter (siehe Anhang C) wird empfohlen. Alle relevanten diagnostischen Informationen zum Messsystem müssen verfügbar sein und routinemäßig gespeichert werden.

9 Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Messunsicherheit

9.1 Allgemeines

Mit der Qualitätslenkung wird sichergestellt, dass die Unsicherheit der Messwerte der Partikelanzahlkonzentration in Außenluft während längerer Messzeiträume im Feld innerhalb festgelegter Grenzen liegt. Wartungsmaßnahmen sowie die Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung sind einzuhalten, um genaue und rückführbare Daten zu erhalten. Die QA/QC-Maßnahmen für die Messausrüstung sind in diesem Abschnitt dargelegt.

Im Allgemeinen sollten auch die endgültigen Daten regelmäßig überprüft werden, sodass die durch interne Diagnosen und Ereignisse mit beispielsweise ungewöhnlich geringen Konzentrationen, zeitlich systematische Konzentrationsänderungen, übermäßiges Rauschen oder anomale Konzentrationsspitzen erzeugten Fehlermerkmale erkannt und untersucht werden können. Derartige Datenüberprüfungen sind in diesem Dokument nicht beschrieben.

In diesem Abschnitt werden außerdem die wesentlichen Beiträge zur Messunsicherheit der Messwerte für die Partikelanzahlkonzentration genannt und wie sie abgeschätzt werden können.

9.2 Häufigkeit der Kalibrierungen, Überprüfungen und Wartungsmaßnahmen

9.2.1 Allgemeines

In Tabelle 4 sind Wartungsmaßnahmen, Überprüfungen und Kalibrierungen sowie deren Mindesthäufigkeit für kontinuierlich betriebene Messgeräte zusammengefasst. Außerdem sind Kriterien angegeben, wann Maßnahmen oder Justierungen erforderlich sind. Werden Messgeräte nicht kontinuierlich betrieben, können die Häufigkeiten entsprechend angepasst werden.

Tabelle 4 — Kalibrierung, Überprüfungen, Wartung und deren Häufigkeit

Kalibrierung, Überprüfungen und Wartung	Abschnitt	Häufigkeit (mindestens)
CPC		
Wartung des CPC	9.2.2	jährlich
Kalibrierung der Linearität	9.2.3	alle 2 Jahre
Bestimmung der Zähleffizienzkurve bei niedriger Partikelanzahl	6.5.6	alle 2 Jahre
Nullzählung	9.2.4	monatlich
Überprüfung der Anzahlkonzentration	9.2.5	12 Monate (größere Häufigkeit wird empfohlen)
Überprüfung des tatsächlichen Volumenstroms	9.2.6	monatlich
Kalibrierung von Temperatur- und Drucksensoren	9.2.7	jährlich
Interne Diagnostik	9.2.8	bei Fernzugriff auf Daten wöchentlich, ansonsten monatlich
Probenahmesystem		
Wartung	9.2.9	Herstellerangabe, mindestens jährlich
Feuchtesensor	9.2.10	jährlich
Verdünnungsfaktor (falls gegeben)	9.2.11	monatlich

Kalibrierung, Überprüfungen und Wartung	Abschnitt	Häufigkeit (mindestens)
Dichtigkeitsprüfung	9.2.12	monatlich
Primärer Probenahmevervolumenstrom	7.6	monatlich

9.2.2 Wartung des CPC

Der CPC muss entsprechend den Herstellerangaben gewartet werden. Vor und nach Wartungen muss eine Überprüfung der Anzahlkonzentration (9.2.5) durchgeführt werden.

9.2.3 Kalibrierung der Linearität

Sowohl im „vorgefundenen“ Zustand als auch nach jeder Wartung ist die Nachweisempfindlichkeit des CPC nach ISO 27891:2015 mit Silberpartikeln (30 nm bis 50 nm, siehe 6.5.4) zu kalibrieren:

- Messung der CPC-Nachweisempfindlichkeit η bei einer Partikelgröße von $30 \text{ nm} \leq D_p \leq 50 \text{ nm}$ (40 ± 10) nm;
- das Ergebnis ist gültig, wenn $0,95 \leq \eta(D_p) \leq 1,05$, andernfalls ist eine Wartung erforderlich.

Die Linearität muss beispielsweise überprüft werden, um Änderungen bei der Koinzidenzkorrektur zu kontrollieren, und zwar nach dem gleichen Verfahren und mit Partikeln der gleichen Größe wie für die Nachweisempfindlichkeit. Hierzu sind die gleichen Anzahlkonzentrationen wie in 6.5.5 anzuwenden. Die Daten müssen das Kriterium für die Residuen von 4 % erfüllen, andernfalls ist eine Wartung erforderlich.

9.2.4 Überprüfung der CPC-Nullzählrate

Bei Verwendung eines Trockners oder Verdünnungssystems sind diese Geräte in die Prüfung der Nullzählrate einzuschließen. Ein ULPA-Filter wird entweder am CPC-, Trockner- oder Verdünnungssystemeinlass angebracht. Der CPC wird mindestens 5 min betrieben, um das Filter und den CPC zu spülen. Der CPC wird weitere mindestens 15 min betrieben. Die Nullzählrate muss in diesem Zeitraum weniger als 15 Impulse je Minute betragen, andernfalls ist eine Wartung erforderlich.

9.2.5 Überprüfung der Anzahlkonzentration

Die Leistungsüberprüfung des CPC muss alle 12 Monate durchgeführt werden (eine größere Häufigkeit wird empfohlen). Diese kann weniger streng als das in 9.2.3 beschriebene Verfahren sein und folgendermaßen durchgeführt werden, entweder

- a) durch einen Feldvergleich mit Außenluft als Prüfaerosol. Ein rückführbar kalibrierter Transferstandard-CPC wird mit der sekundären Probenahmeleitung über einen Y-Verteiler verbunden. Diese Prüfung muss mindestens 1 h durchgeführt werden, um die Zähleffizienz am Plateau zu bestimmen,
- b) oder durch einen Feldvergleich gegen einen rückführbar kalibrierten Transferstandard-CPC mit einem synthetischen Aerosol. Beispiele für geeignete Aerosolmaterialien sind NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und DEHS mit Partikeldurchmessern von 50 nm bis 200 nm und einer Partikelanzahlkonzentration $< 10\,000 \text{ cm}^{-3}$. Die Feuchte des Prüfaerosols muss die Anforderung der Tabelle 2 erfüllen. Diese Prüfung muss für mindestens 15 min durchgeführt werden.

Verfahren b) kann an Messstationen mit relativ hohen Partikelanzahlkonzentrationen (über ca. $10\,000 \text{ cm}^{-3}$) bevorzugt sein, führt allerdings zu einer Unterbrechung der Routinemessungen.

Wenn die mit dem Feld-CPC bestimmte mittlere Konzentration um mehr als 10 % von der des Referenz-transferstandard-CPC abweicht, ist eine Wartung erforderlich.

9.2.6 Überprüfung des tatsächlichen Volumenstroms

In einem Zeitraum von mindestens 5 min werden 5 aufeinanderfolgende Messungen durchgeführt. Der Mittelwert der Messergebnisse muss mit dem kalibrierten Volumenstrom verglichen werden und die relative Abweichung darf 10 % nicht überschreiten. Wird dieses Kriterium nicht eingehalten, dann ist eine Wartung erforderlich.

Der verwendete Durchflussmesser muss regelmäßig kalibriert werden, seine Genauigkeit muss $\leq 3 \%$ sein.

9.2.7 Kalibrierung der Temperatur- und Drucksensoren

Die Temperatur- und Drucksensoren für die Korrektur der Probenvolumina auf Normtemperatur und Normdruck müssen nach einem geeigneten Verfahren kalibriert werden, sodass die Werte für Temperatur und Druck innerhalb von 3 K bzw. innerhalb von 1 kPa korrekt sind.

9.2.8 Interne Diagnostik des CPC

Die interne Diagnostik, insbesondere Warn- und Fehlermerker, müssen bei Fernzugriff auf Daten mindestens wöchentlich und ansonsten monatlich überprüft werden. Die Anwender müssen für ihre Geräte geeignete Verfahren entwickeln. Beträgt die Datenverfügbarkeit beispielsweise für die letzten 7 Tage weniger als 99 %, können die Fehlermerker auf Aufzeichnungsfehler überprüft werden. Erforderlichenfalls sind Korrekturmaßnahmen einzuleiten (z. B. CPC-Wartung).

9.2.9 Wartung des Probenahmesystems

Das Probenahmesystem ist nach den Herstellerangaben zu warten.

9.2.10 Feuchtesensor

Der Sensor zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte im Probenahmesystem ist nach einem geeigneten Verfahren zu kalibrieren, sodass die Werte für die relative Luftfeuchte zwischen 20 % und 80 % innerhalb von $\pm 3 \%$ korrekt sind.

9.2.11 Verdünnungsfaktor (falls gegeben)

Enthält das Probenahmesystem eine Verdünnungseinrichtung, dann muss der Verdünnungsfaktor nach einem der in 7.5 beschriebenen Verfahren ermittelt werden; er muss mit dem zuvor bestimmten Wert innerhalb $\pm 5 \%$ übereinstimmen. Ist die Abweichung größer als 5 %, dann ist eine Wartung erforderlich.

9.2.12 Dichtigkeitsprüfung

Am Einlass des Systems oder über ein optionales Dreiwegeventil wird ein ULPA-Filter angebracht (siehe Bild B.1). Das System wird mindestens 5 min gespült. Die Dichtigkeit des Probenahmesystems ist über mindestens 15 min zu prüfen. Die Nullzählrate muss während dieses Zeitraums kleiner als 15 Impulse je Minute sein. Diese Prüfung schließt die Überprüfung der Nullzählrate des CPC nach 9.2.5 mit ein, die bei bestandener Prüfung nicht mehr gesondert durchgeführt werden muss. Wird nur Überprüfung der Nullzählrate des CPC bestanden, ist eine Wartung des Probenahmesystems erforderlich.

9.3 Messunsicherheit

9.3.1 Allgemeines

Die Unsicherheitsbetrachtungen in 9.3 sind auf CPCs beschränkt, die den gesamten Einlassvolumenstrom analysieren. Bei Geräten, die nur einen Teil des Einlassvolumenstroms analysieren, der einer externen Volumenstrommessung nicht zugänglich ist, sind die Parameter zur Bestimmung des analysierten Volumenstroms auf rückführbare Weise zu bestimmen. Diese Parameter sind zusätzliche Unsicherheitskomponenten,

die die Gesamtunsicherheit der Messung erhöhen. Für den hier betrachteten Fall sind die wesentlichen Beiträge zur Messunsicherheit für Messungen mit einer Dauer von 1 min in Tabelle 5 angegeben. In der Praxis ist zufälliges Rauschen nur für sehr niedrige Partikelkonzentrationen signifikant und somit wird die Unsicherheit für über einen längeren Zeitraum gemittelte Messungen ähnlich sein.

Tabelle 5 — Unsicherheitskomponenten und deren Ermittlung

Unsicherheitskomponente	Symbol	Abschnitt	Abschätzung
Nachweisempfindlichkeit am CPC-Plateau	u_{η}	9.3.2	Angabe in der CPC-Kalibrierbescheinigung
Drift der CPC-Nachweisempfindlichkeit	u_{drift}	9.3.3	Analyse der Stabilität zwischen Kalibrierungen
Volumenstrommessung	u_{flow}	9.3.4	anhand der Unsicherheit der Volumenstromkalibrierung und der Langzeitstabilität
Volumenkorrektur auf Normtemperatur und -druck	u_{STP}	9.3.5	anhand der Unsicherheit von T - und p -Messungen
Probenahmeverluste aufgrund der Diffusion zu den Wänden	u_{loss}	9.3.6	fester Wert, theoretisch berechnet
Verdünnungsfaktor (falls gegeben)	u_{dil}	9.3.7	anhand der Unsicherheit des zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors angewendeten Verfahrens und anhand der Stabilität dieser Bestimmungen

Zur Unsicherheit tragen viele weitere Faktoren bei, die hier allerdings als vernachlässigbar angesehen werden, z. B.:

- CPC-Nichtlinearität;
- untere Nachweisgrenze (Cut-off) des CPC: der Einfluss hängt stark von der Partikelgrößenverteilung ab, ist im Allgemeinen jedoch sehr gering;
- hygroskopisches Wachstum: das Wachstum der Partikel im Probenahmesystem hat selbst nach Kontrolle der Luftfeuchte einen gewissen Einfluss auf die Größenverteilung, jedoch nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Gesamtanzahl durch Änderung der unteren Nachweisgrenze (Cut-off);
- Wiederholpräzision: wie oben erwähnt ist das zufällige Rauschen nur bei sehr niedrigen Partikelkonzentrationen signifikant;
- Undichtigkeit: bei den festgelegten Kriterien ist der Beitrag der Undichtigkeit zur Unsicherheit sehr gering.

9.3.2 Nachweisempfindlichkeit am CPC-Plateau

Nach ISO 27891:2015 wird bei der jährlichen Kalibrierung des CPC eine Bescheinigung ausgestellt, in der ein Wert für die Unsicherheit bei der Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit angegeben ist. Die Komponente u_{η} ist der 1- σ -Wert, sodass u_{η} die Hälfte dieses Werts beträgt, wenn die Unsicherheit über $k = 2$ oder als 95-%-Vertrauensbereich dargestellt wird. Die Komponente ist als prozentualer Anteil der Nachweisempfindlichkeit anzugeben.

9.3.3 Drift der CPC-Nachweisempfindlichkeit

Die Drift der CPC-Nachweisempfindlichkeit η_{diff} wird anhand der typischen Differenz zwischen der Nachweisempfindlichkeit „nach der Wartung“ und der vorherigen „vorgefundenen“ Nachweisempfindlichkeit berechnet.

Der Mittelwert dieser Differenzen $\bar{\eta}_{\text{diff}}$ wird berechnet. Für die Anwendung dieses Dokuments beträgt die Unsicherheitskomponente $u_{\text{drift}} = 100 \cdot \bar{\eta}_{\text{diff}} / 2 \cdot \eta$, wobei η die mittlere Nachweisempfindlichkeit „nach der Wartung“ ist.

9.3.4 Volumenstrommessung

Bei Einhaltung der QA/QC-Kriterien kann angenommen werden, dass der tatsächliche Volumenstrom innerhalb von ± 2 % des analysierte Volumenstroms liegt. Für die Anwendung dieses Dokuments wird eine Rechteckverteilung angenommen, sodass die Unsicherheitskomponente $u_{\text{flow}} = 2/\sqrt{3} \% = 1,2$ % beträgt. Falls die Kriterien nicht erfüllt werden oder die Volumenstromstabilität nachweislich besser als die Kriterien ist, muss die Komponente entsprechend verändert werden.

9.3.5 Korrektur auf Normtemperatur und Normdruck

Bei Einhaltung der QA/QC-Kriterien kann angenommen werden, dass die relevanten Temperaturen und Drücke innerhalb von 3 K bzw. innerhalb von 1 kPa korrekt sind. Beide Kriterien stellen Abweichungen von etwa 1 % der korrigierten Volumenstromwerte dar. Für die Anwendung dieses Dokuments wird davon ausgegangen, dass die beiden Abweichungen unabhängig sind und Rechteckverteilungen haben. In diesem Fall beträgt die Unsicherheitskomponente $u_{\text{STP}} = \sqrt{2}/\sqrt{3} \% = 0,8$ %. Wenn die Kriterien nicht erfüllt sind oder die Temperatur- und Druckmessungen nachweislich besser als die Kriterien sind, muss die Komponente entsprechend verändert werden.

9.3.6 Diffusionsverluste im Probenahmesystem

Die tatsächliche Verringerung der Partikelanzahl aufgrund der Diffusion zu den Wänden hängt vom Messsystem und von der Größenverteilung der gemessenen Partikel ab. Im Prinzip stellt diese Unsicherheitskomponente eine typische Differenz dar, die identische CPCs mit konformen Probenahmesystemen verschiedener Ausführung an der gleichen Stelle zur gleichen Zeit aufzeichnen würden.

Bei 10 nm großen Partikeln dürfen die Diffusionsverluste 25 % nicht überschreiten (siehe 7.2, Tabelle 2). Bei einem üblichen Probenahmesystem mit einem Primärvolumenstrom von 16,67 l/min, einer effektiven Länge vom Einlassquerschnitt bis zum Strömungsteiler von 3,5 m, einem Sekundärvolumenstrom von 1 l/min, mit integriertem Trockner im Sekundärvolumenstrom zum CPC und ohne Verdünnung, können bei 10 nm Diffusionsverluste von etwa 18 % erwartet werden, siehe Beispielberechnung in Anhang B. Bei einem optimierten Probenahmesystem ohne Trockner können die Diffusionsverluste bei 10 nm auf etwa 6 % verringert werden (Idealfall).

Da die Partikelverluste im Probenahmesystem eine Funktion der Partikelgröße sind, hängt die Abweichung der gemessenen Partikelanzahlkonzentration für unterschiedlich konstruierte Probenahmesysteme von der zu messenden Partikelgrößenverteilung ab. In Situationen, in denen ein Nukleationsmodus und ein Akkumulationsmodus in der Partikelanzahlgrößenverteilung vorliegen, sind bei der gemessenen Partikelanzahlkonzentration Abweichungen bis zu 7 % zwischen dem ungünstigsten Fall (25 % Verluste bei 10 nm) und dem Idealfall (6 % Verluste bei 10 nm) zu erwarten. Ohne Nukleationsmodus werden die zuvor erwähnten Abweichungen zwischen dem ungünstigsten Fall und dem Idealfall auf etwa 3 % verringert.

Für die Anwendung dieses Dokuments muss der Beitrag der Ausführung des Probenahmesystems zur relativen Standardunsicherheit mit 2 % angesetzt werden. Das entspricht ungefähr dem Wert für die maximale Spanne, wenn sie behandelt wird, als hätte sie eine Rechteckverteilung ($7/2\sqrt{3} \%$).

9.3.7 Verdünnungsfaktor (sofern gegeben)

In Tabelle 2 und 9.2.12 sind die Kriterien für die Genauigkeit des Verdünnungsfaktors mit $\pm 5\%$ angegeben. Für die Anwendung dieses Dokuments wird eine Rechteckverteilung angenommen, sodass die Unsicherheitskomponente $u_{\text{dil}} = 5/\sqrt{3}\% = 2,9\%$ beträgt. Wenn die Kriterien nicht erfüllt sind oder die Genauigkeit des Verdünnungsfaktors nachweislich besser als die Kriterien ist, muss die Komponente entsprechend verändert werden.

9.3.8 Berechnung der Gesamtunsicherheit

Alle diese Unsicherheitskomponenten leisten einen linearen Beitrag zum Ergebnis. Für die Anwendung dieses Dokuments wird davon ausgegangen, dass sie unabhängig sind, sodass die kombinierte Standardunsicherheit, in %, gegeben ist durch:

$$u_c = \sqrt{u_{\eta}^2 + u_{\text{drift}}^2 + u_{\text{flow}}^2 + u_{\text{STP}}^2 + u_{\text{loss}}^2 + u_{\text{dil}}^2} \quad (5)$$

Der Erweiterungsfaktor k wird mit 2 angesetzt, sodass die erweiterte Unsicherheit U , in %, gegeben ist durch:

$$U = 2 \cdot u_c$$

Im Anhang D ist ein Beispiel für die Berechnung der Messunsicherheit für eine 1-Minuten-Messung angegeben.

Anhang A (normativ)

Ermittlung der Diffusionsverluste in Probenahmeleitungen

Partikelverluste ultrafeiner Partikel (< 100 nm) in Aerosol-Probenahmeleitungen werden hauptsächlich durch Aerosoldiffusion verursacht. Die durch Diffusion hervorgerufene Partikelbewegung ist zufällig, aber ein Konzentrationsgradient führt zu einem auf eine Oberfläche gerichteten Nettotransport. Ultrafeine Partikel, die sich an einer Wand ablagern, haften dort aufgrund der van-der-Waals-Kräfte. Das Diffusionsverhalten der Partikel wird vom Diffusionskoeffizienten D bestimmt, der mit abnehmender Partikelgröße entsprechend folgender Gleichung zunimmt:

$$D = \frac{k \cdot T \cdot C_c}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D_p} = k \cdot T \cdot B \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

k die Boltzmann-Konstante ($k = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$ J/K);

T die absolute Temperatur;

C_c der Cunningham-Korrekturfaktor;

η die Gasviskosität;

D_p der Partikeldurchmesser;

B die mechanische Beweglichkeit eines Partikels.

Der Cunningham-Korrekturfaktor kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$C_c = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{D_p} \cdot \left(1,165 + 0,483 \cdot \exp\left(-0,997 \cdot \frac{D_p}{2 \cdot \lambda}\right) \right) \quad (\text{A.2})$$

Dabei ist

λ die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle.

Die Druck- und Temperaturabhängigkeit der mittleren freien Weglänge und der Gasviskosität kann mit Hilfe folgender Gleichungen berücksichtigt werden:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right) \cdot \left(\frac{T_0 + 110,4}{T + 110,4}\right) \quad (\text{A.3})$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_0 + 110,4}{T + 110,4}\right) \quad (\text{A.4})$$

$$T_0 = 296,15 \text{ K}$$

$$p_0 = 101,3 \text{ kPa}$$

$$\lambda_0 = 0,0673 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\eta_0 = 18,3245 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$$

Die größenabhängige Partikelpenetration P in einer Rohrleitung mit laminarer Strömung kann theoretisch abgeschätzt werden. Die Penetration hängt von einem dimensionslosen Parameter μ ab, der wie folgt definiert ist:

$$\mu = \frac{D \cdot L}{Q} \quad (\text{A.5})$$

Dabei ist

D der Diffusionskoeffizient;

L die Länge der Rohrleitung;

Q der Volumenstrom des Aerosols.

Der Parameter μ hängt nicht vom Innendurchmesser der Rohrleitung ab, das heißt, die Diffusionsverluste hängen nur vom Volumenstrom ab und der Rohrlängendurchmesser kann als freier Parameter bei der Konstruktion eines Probenahmesystems verwendet werden, z. B. um laminare Strömungsbedingungen einzustellen.

In Abhängigkeit vom Wert des Parameters μ wird die Penetration mit zwei verschiedenen Gleichungen bestimmt.

Für $\mu < 0,007$:

$$P = \frac{\eta_{\text{out}}}{\eta_{\text{in}}} = 1 - 5,50 \cdot \mu^{2/3} + 3,77 \cdot \mu \quad (\text{A.6})$$

für $\mu > 0,007$:

$$P = \frac{n_{\text{out}}}{n_{\text{in}}} = 0,819 \cdot \exp(-11,5 \cdot \mu) + 0,0975 \cdot \exp(-70,1 \cdot \mu) + 0,0325 \cdot \exp(-179 \cdot \mu) \quad (\text{A.7})$$

Die beiden Gleichungen stammen aus [2]. Die Genauigkeit ist besser als 1 % für alle Werte des dimensionslosen Parameters μ .

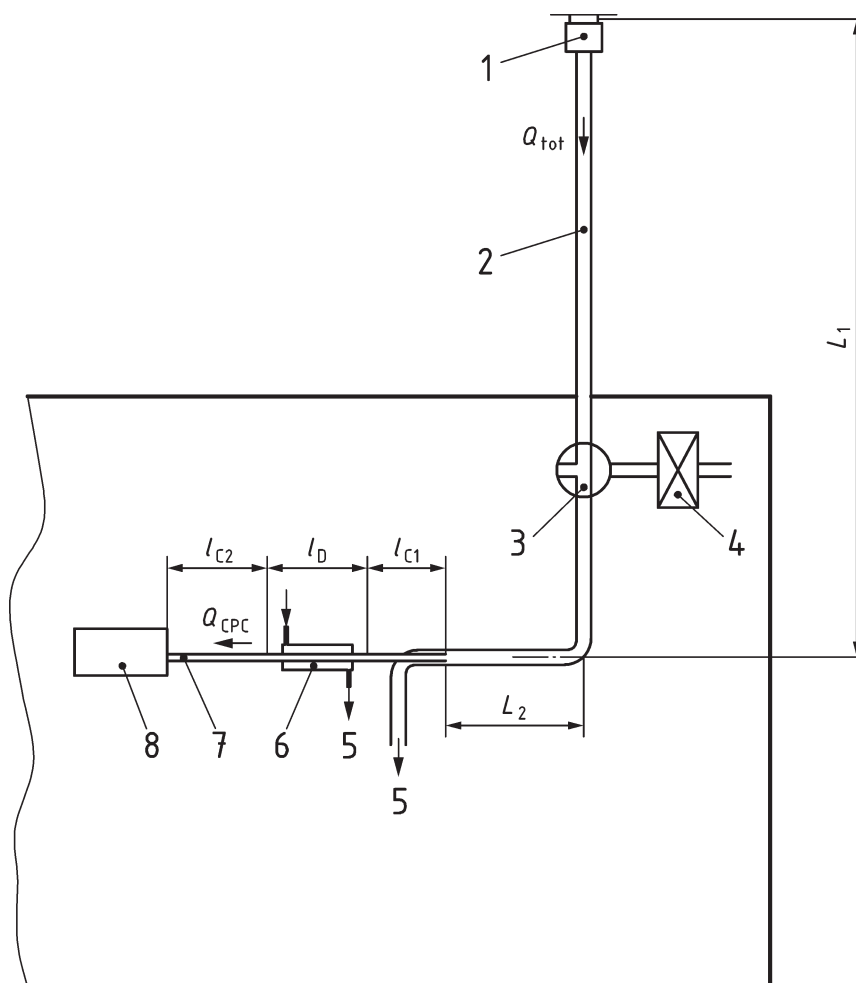
Größenabhängige Diffusionsverluste können experimentell bestimmt werden, indem monodisperse (z. B. mit einem Differentiellen Elektrischen Mobilitätsklassierer (DEMC) größenklassifizierte) Partikel, gemischt mit partikelfreiem Trägergas, in die betreffende Komponente des Probenahmesystems (z. B. Verdünnungssystem oder Trockner) geleitet werden. Die Penetration in dieser Komponente wird dann durch Messung der Eingangs- und Ausgangskonzentration mit einem CPC bestimmt. Das Verhältnis aus Ausgangs- zu Eingangskonzentration bei einer gegebenen Partikelgröße entspricht der Penetration P und $(1 - P)$ entspricht dem zugehörigen Diffusionsverlust. Zur Ermittlung der Penetration bei 10 nm können mit dem Verdampfungs-/Kondensationsverfahren erzeugte Silberpartikel verwendet werden.

Anhang B (informativ)

Beispiel für die Berechnung der Diffusionsverluste in einem Probenahmesystem

B.1 Beschreibung des Probenahmesystems

Bild B.1 zeigt das Modell eines Probenahmesystems, für das die Diffusionsverluste berechnet werden.



Legende

- 1 PM10-/PM2,5-Probenahmekopf
- 2 primäre Probenahmeleitung
- 3 optionales Dreiwegeventil zur Dichtigkeitsprüfung und Messung des Primärvolumenstroms
- 4 optionales ULPA-Filter zur Dichtigkeitsprüfung
- 5 zur kritischen Düse und zur Vakuumpumpe
- 6 Nafion®-Trockner
- 7 sekundäre Probenahmeleitung (CPC-Probenahmeleitung)
- 8 CPC

Bild B.1 — Modell eines CPC-Probenahmesystems