

DIN ISO 16000-42

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

ICS 13.040.20

Einsprüche bis 2022-02-10

Entwurf

**Innenraumluftverunreinigungen –
Teil 42: Messen der Partikelanzahlkonzentration mit
Kondensationspartikelzählern (ISO/DIS 16000-42:2021);
Text Deutsch und Englisch**

Indoor air –

Part 42: Measurement of the particle number concentration by Condensation Particle Counters (ISO/DIS 16000-42:2021);
Text in German and English

Air intérieur –

Partie 42: Mesure de la concentration en nombre de particules à l'aide d'un compteur de particules à noyaux de condensation (CPC) (ISO/DIS 16000-42:2021);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-12-10 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 84 Seiten

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

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	7
Vorwort	8
Einleitung	9
1 Anwendungsbereich.....	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe	10
4 Abkürzungen	13
5 Quellen von Partikeln in der Luft	13
5.1 Rauchen.....	14
5.2 Kochen	14
5.3 Partikelbildung – Bildung von sekundärem organischem Aerosol (SOA).....	14
5.4 Außenluft.....	14
5.5 Sonstige Quellen.....	14
6 Dynamik von ultrafeinen Partikeln in Innenräumen	15
6.1 Eintritt und Entfernung.....	16
6.2 Ablagerung.....	16
6.3 Partikelbildung, Phasenübergang und Koagulation	16
7 Messprinzip	17
7.1 Beschreibung des Messprinzips.....	17
7.1.1 Arbeitsfluid	17
7.1.2 Minimale Nachweisgröße	18
7.1.3 Partikelgrößenverteilung	20
7.2 Minimale CPC-Anforderungen	20
7.3 Allgemeine Probenahme-Empfehlungen.....	21
8 Messstrategie	21
8.1 Durchschnittliche Raumkonzentration.....	22
8.1.1 Ruhezustand ohne Aktivität	23
8.1.2 Ruhezustand mit Geräteaktivität	23
8.1.3 Aktiver Zustand.....	23
8.2 Quellenuntersuchung / -identifizierung.....	23
8.3 Infiltration aus dem Freien oder aus angrenzenden Räumen	24
8.4 Messung in Fahrzeuginnenräumen.....	25
8.5 Erfolgskontrolle von Minderungsmaßnahmen	25
9 Qualitätssicherung und Bewertung der Messunsicherheit.....	26
9.1 Allgemeines	26
9.2 Messgeräteparameter.....	26
9.3 Kontrollieren der CPC-Einstellungen.....	27
9.4 Leistungskontrolle / Nullpunktkontrolle / Lecktest.....	27
9.5 Unsicherheit	27
10 Bewertung und Angabe der Ergebnisse	28

Anhang A (informativ) Beispiele für während Aktivitäten der Raumbenutzer angetroffene Partikelkonzentrationen.....	29
Anhang B (informativ) Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung von Innenraum-Aerosolen mit einem differentiellen Mobilitätsanalysatorsystem (en: differential-mobility analysing system, DMAS).....	33
Anhang C (informativ) Wasser-CPC	36
Anhang D (informativ) Checkliste zum Sammeln von Informationen, die für die Interpretation von Messungen der Partikelanzahlkonzentration in Innenräumen nützlich sind.	39
Literaturhinweise.....	44

Nationales Vorwort

Internationale Technische Regelsetzung zum Innenraumluftbereich

Dieses Dokument (ISO 16000-42:2021) wurde von der Arbeitsgruppe ISO/TC 146/SC 6/WG 21, „Strategies for the measurement of airborne particles“, des Technischen Komitees ISO/TC 146, „Air quality“, Unterkomitee SC 6, „Indoor air“, erarbeitet. Das Sekretariat der WG 21 liegt bei DIN (Deutschland). An der Erstellung dieser Norm war der Fachbereich IV „Umweltmesstechnik“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss, Unterausschuss NA 134-04-04-04 UA „Messung luftgetragener Partikel (UFP, PM_{2,5}, PM₁₀)“ maßgeblich beteiligt.

Nationale Technische Regelsetzung zum Innenraumluftbereich

Normenreihe DIN ISO 16000 bzw. Normenreihe DIN EN ISO 16000 mit dem allgemeinen Titel Innenraumluftverunreinigungen besteht aus folgenden Teilen:

DIN EN ISO 16000-1, *Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie*

DIN EN ISO 16000-2, *Probenahmestrategie für Formaldehyd*

DIN ISO 16000-3, *Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern — Probenahme mit einer Pumpe*

DIN ISO 16000-4, *Bestimmung von Formaldehyd — Probenahme mit Passivsammlern*

DIN EN ISO 16000-5, *Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC)*

DIN ISO 16000-6, *Bestimmung organischer Verbindungen (VVOC, VOC, SVOC) in Innenraum- und Prüfkammerluft durch aktive Probenahme auf Adsorptionsröhrchen, thermischer Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS FID*

DIN EN ISO 16000-7, *Probenahmestrategie zur Bestimmung luftgetragener Asbestfaserkonzentrationen*

DIN ISO 16000-8, *Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen*

DIN EN ISO 16000-9, *Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bau-produkten und Einrichtungsgegenständen — Emissionsprüfkammer-Verfahren*

DIN EN ISO 16000-10, *Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bau-produkten und Einrichtungsgegenständen — Emissionsprüfzellen-Verfahren*

DIN EN ISO 16000-11, *Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bau-produkten und Einrichtungsgegenständen — Probenahme, Lagerung der Proben und Vorbereitung der Prüfstücke*

DIN EN ISO 16000-12, *Probenahmestrategie für polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polycyclische aromatische Kohlenwasser-stoffe (PAH)*

DIN ISO 16000-13, *Bestimmung der Summe gasförmiger und partikelgebundener dioxin-ähnlicher polychlorierter Biphenyle (PCB) und polychlorierter Dibenzo-p-dioxine/Dibenzofurane (PCDD/PCDF) — Probenahme auf Filtern mit nachgeschalteten Sorbenzien*

DIN ISO 16000-14, *Bestimmung der Summe gasförmiger und partikelgebundener polychlorierter dioxin-ähnlicher Biphenyle (PCB) und polychlorierter Dibenzo-p-dioxine/Dibenzofurane (PCDD/PCDF) — Extraktion, Reinigung und Analyse mit hochauflösender Gaschromatographie und Massenspektrometrie*

DIN EN ISO 16000-15, *Probenahmestrategie für Stickstoffdioxid (NO₂)*

DIN ISO 16000-16, *Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen — Probenahme durch Filtration*

DIN ISO 16000-17, *Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen — Kultivierungsverfahren*

DIN ISO 16000-18, *Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen — Probenahme durch Impaktion*

DIN ISO 16000-19, *Probenahmestrategie für Schimmelpilze*

DIN ISO 16000-20, *Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen — Bestimmung der Gesamtsporenanzahl*

DIN ISO 16000-21, *Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen — Probenahme von Materialien*

DIN ISO 16000-24, *Leistungsprüfung zur Beurteilung der Konzentrationsminderung von flüchtigen organischen (ohne Formaldehyd) durch sorbierende Baumaterialien*

DIN ISO 16000-25, *Bestimmung der Emission von schwerflüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten — Mikro-Prüfkammerverfahren*

DIN EN ISO 16000-26, *Probenahmestrategie für Kohlendioxid (CO₂)*

DIN ISO 16000-27, *Standardverfahren für die quantitative Analyse von Asbestfasern in abgelagertem Staub*

DIN ISO 16000-28, *Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer*

DIN ISO 16000-29, *Prüfverfahren für VOC Detektoren*

DIN ISO 16000-30, *Sensorische Prüfung der Innenraumluft*

DIN ISO 16000-31, *Bestimmung von Flammenschutzmitteln und Weichmachern auf der Basis phosphororganischer Verbindungen — Phosphorsäureester*

DIN ISO 16000-32, *Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe*

DIN ISO 16000-33, *Bestimmung von Phthalaten mit Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS)*

DIN ISO 16000-34, *Innenraumluftverunreinigungen — Teil 34: Strategien zur Messung von Schwebstoffen*

DIN ISO 16000-36, *Prüfkammer-Verfahren zur Bestimmung der Minderungsrate luftgetragener, kultivierbarer Bakterien durch Luftreiniger mit einer Prüfkammer*

DIN ISO 16000-37, *Messung der PM_{2,5}-Massenkonzentration*

DIN ISO 16000-38, *Bestimmung von Aminen in Innenraum- und Prüfkammerluft — Aktive Probenahme von Probenahmeeinrichtungen mit durch Phosphorsäure imprägnierte Filter*

DIN ISO 16000-39, *Bestimmung von Aminen — Analyse von Aminen durch (Ultra-) Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) gekoppelt mit hochauflösender oder Tandem-Massenspektrometrie (MS/MS)*

DIN ISO 16000-40, *Innenraumluftqualitätsmanagementsystem*

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

Für die im Abschnitt 2 zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 16000-34 siehe DIN ISO 16000-34

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

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 16000-34, *Innenraumluftverunreinigungen — Teil 34: Strategien zur Messung von Schwebstoffen*
(ISO 16000-34:2018)

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 146, *Air quality*, Unterkomitee SC 6, *Indoor air*, erarbeitet.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 16000 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden

Einleitung

Personen verbringen die meiste Zeit des Tages in Innenräumen, wo sie verschiedenen Quellen von Partikeln ausgesetzt sind. Solche Partikel können Staubpartikel und Partikel aus Verbrennungsprozessen wie Kerzen, Kochen und Kaminfeuern sein. Partikel können auch durch Heimwerkertätigkeiten und den Betrieb von elektrischen Geräten wie Druckern freigesetzt werden. Klassische Materialien für die Gebäudehülle sind nicht geeignet, den Partikeltransport zwischen Innen- und Außenbereich zu verhindern. Die Quellen für Partikel im Freien sind vielfältig und umfassen den Verkehr und andere Verbrennungsprozesse sowie industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten. Der Luftaustausch wird durch natürliche Infiltration und Belüftung, aber auch durch die im Gebäude vorhandene mechanische Belüftung bewirkt.

All dies kann zu sehr unterschiedlichen Partikelmassenkonzentrationsniveaus in Innenräumen führen, deren Auswirkungen auf die Gesundheit nicht leicht zu bestätigen oder zu beurteilen sind.

Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass ultrafeine Partikel (UFP) negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können [1]. Aufgrund ihrer sehr geringen Größe können sie tatsächlich tief in den menschlichen Körper eindringen.

Mit Partikel-Messgeräten kann entweder die Gesamtpartikelanzahlkonzentration oder die Partikelanzahlgrößenverteilung bestimmt werden. Dieses Dokument beschreibt die allgemeinen Strategien für die Messung von Submikronpartikeln in Innenräumen, wobei der Schwerpunkt auf der Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration liegt.

Dieses Dokument wurde als Antwort auf die Notwendigkeit einer besseren Vergleichspräzision von Methoden zur Partikelmessung erstellt.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der ISO 16000 legt die Messverfahren und -strategien zur Bestimmung der Gesamtzahl luftgetragener Partikel je Volumeneinheit Luft in Innenräumen bei Verwendung eines Kondensationspartikelzählers (en: Condensation Particle Counter, CPC) fest. Dieses Gerät zählt alle Partikel der Größen zwischen etwa 10 nm und etwa 3 µm. Da die Partikelanzahlkonzentration häufig von der UFP-Fraktion dominiert wird, kann das Ergebnis als Näherung für die UFP-Konzentration verwendet werden.

Die Qualitätssicherung, die Bestimmung der Messunsicherheit und die Mindestangaben für die Berichterstattung sind ebenfalls Teil dieses Dokuments.

Dieses Dokument gilt für Innenräume wie in ISO 16000-1 definiert.

Dieses Dokument behandelt nicht die Bestimmung von Bio-Aerosolen oder die chemische Charakterisierung von Partikeln. Dennoch können einige Bioaerosole vom CPC erfasst werden und tragen dann zur gemessenen Partikelanzahl bei. Für die Messung und Beurteilung der Staubzusammensetzung wird auf die entsprechenden technischen Vorschriften in der Internationalen Normenreihe ISO 16000 verwiesen.

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).

EN ISO 16000-1, *Innenraumluftverunreinigungen — Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie*

ISO 16000-34, *Indoor air — Part 34: Strategies for the measurement of airborne particles*

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

CEN/TS 16976, *Außenluft — Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols*

3 Begriffe

3.1

Aerosol

Mehrphasensystem aus in einem Gas suspendierten festen und/oder flüssigen Partikeln mit einer Partikelgröße von 0,001 µm bis 100 µm

[QUELLE: CEN/TS 16976:2016]

3.2

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]

3.3

Partikelanzahlkonzentration

Anzahl der Partikel je Trägergasvolumen

[QUELLE: ISO 27891:2015, modifiziert: Die Anmerkung wurde gelöscht]

3.4

Ultrafeine Partikel

Partikel mit einem Nenndurchmesser von 100 nm oder weniger

[QUELLE: ISO 16000-34]

3.5

Nachweiseffizienz

Verhältnis zwischen der von einem Gerät angezeigten Konzentration und der tatsächlichen Konzentration am Einlass des Geräts

[QUELLE: ISO 27891:2015]

3.6

D_x

Partikeldurchmesser, für den beim Vergleich des CPC-Ergebnisses mit der Referenzkonzentration eine Nachweiseffizienz von x % erzielt wird. Diese Nachweiseffizienz ist eine Funktion des CPC selbst, hängt aber auch bis zu einem gewissen Grad von der Art der Partikel ab. Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die in ISO 27891:2015 beschriebenen Silberpartikel und Prüfbedingungen

3.7

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 Partikelanzahlkonzentration, Strömungsgeschwindigkeit durch die Messzone und Größe der Messzone zusammen.

[QUELLE: CEN/TS 16976:2016]

3.8

Nenndurchflussrate

Durchflussrate, die vom Hersteller auf dem Datenblatt des Messgeräts angegeben wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nenndurchflussrate ist diejenige Durchflussrate, für die ein bestimmtes CPC-Modell vom Hersteller ausgelegt ist. Die tatsächliche Durchflussrate einzelner Messgeräte kann sich aufgrund von Herstellungstoleranzen von der Nenndurchflussrate unterscheiden.

[QUELLE: CEN/TS 16976]

3.9

werkszertifizierte Durchflussrate

Durchflussrate eines einzelnen Messgeräts zum Zeitpunkt der Werkskalibrierung, gemessen am Einlass unter den tatsächlichen Luftbedingungen und dokumentiert in einem Prüfzertifikat

[QUELLE: CEN/TS 16976]

3.10

Durchfluss im Betriebszustand

Volumenstrom eines einzelnen Messgeräts, gemessen an dessen Einlass unter tatsächlichen Luftbedingungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Es wird empfohlen, die tatsächliche Durchflussrate während des Betriebs in regelmäßigen Abständen zu messen.

[QUELLE: CEN/TS 16976]

3.11

berechnete Durchflussrate

Durchflussrate, die in direktem Zusammenhang mit der Zählrate und der Partikelanzahlkonzentration steht

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Durchflussrate wird für die Berechnung der Partikelanzahlkonzentration im Messgerät verwendet. Sie hängt vom Messgerätyp ab und kann als Nennwert, als werkszertifizierter Wert oder als tatsächliche Einlass-Durchflussrate vorliegen. Sie kann auch einen Kalibrierungsfaktor enthalten, sofern nicht der gesamte Einlassstrom analysiert wird.

[QUELLE: CEN/TS 16976]

3.12

Kalibrierung

Vorgehensweise, bei der unter festgelegten Bedingungen in einem ersten Schritt eine Relation zwischen den Größenwerten mit Messunsicherheiten durch Messnormen und den entsprechenden Anzeigen mit verbundenen Messunsicherheiten bestimmt wird und diese Informationen in einem zweiten Schritt dann genutzt werden, um eine Relation zur Erlangung eines Messergebnisses aus einer Anzeige zu bestimmen

[QUELLE: JCGM 200:2012, 2.39, modifiziert — Die Anmerkungen wurden entfernt.]

3.13

Unsicherheit

<der Messung> dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die sinnvollerweise der Messgröße zugeordnet werden können

[QUELLE: JCGM 100:2008, 2.2.3, modifiziert — Die Anmerkungen wurden entfernt.]

3.14

Parallelmessung

Messung mit einem Messsystem, das über denselben Zeitraum Proben aus derselben Luft entnimmt

[QUELLE: ISO 16000-37:2019]

3.15

Atembereich

halbkugelförmiger Raum mit einem Radius von 50 cm vor dem Gesicht einer Person

[QUELLE: ISO 12219-1:2020; 3.8 modifiziert]

4 Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Abkürzungen.

JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
UFP	ultrafeine Partikel
QA	Qualitätssicherung
QC	Qualitätskontrolle

5 Quellen von Partikeln in der Luft

Bild 1 zeigt den Größenbereich von Partikeln in der Luft, die mit verschiedenen Quellen in Verbindung gebracht werden. Diese Partikel können durch Aktivitäten oder ohne Aktivitäten entstehen oder durch Luftbewegung transportiert werden. Diese Quellen unterscheiden sich in ihrer Wirkungszeit sowie in der Anzahl und Art der erzeugten Partikel [2, 3].

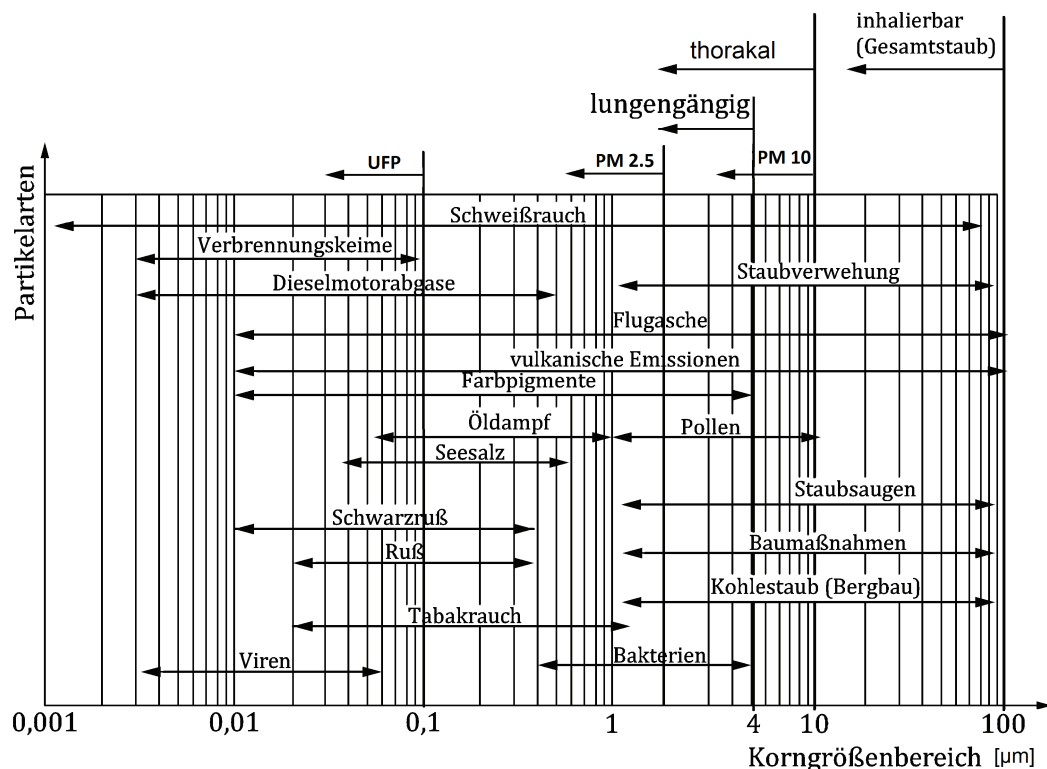


Bild 1 — Quellen von Partikeln in der Luft

Der Größenbereich ist von einer Quelle zur anderen unterschiedlich. Quellen, die die UFP-Konzentration in Innenräumen beeinflussen können, sind im Folgenden kurz aufgeführt. Dennoch wird die Gesamtzahl immer deutlich von den kleinsten Partikeln bestimmt. Die Vernachlässigung von Partikeln, die größer als 1 µm sind, hat daher Auswirkungen auf die Gesamtanzahl, die viel geringer sind als die Gesamtmessunsicherheit des Verfahrens.

Verbrennung von organischem Material

Jede Verbrennung von organischem Material setzt Partikel verschiedener Größen frei, deren Mehrzahl Partikel im Größenbereich von $< 1 \mu\text{m}$, hauptsächlich im UFP-Bereich $< 0,1 \mu\text{m}$ sind. Die Forschung hat gezeigt, dass beim Abbrennen von Kerzen das Niveau der UFP-Emissionen vom Kerzenmaterial, aber auch vom Verbrennungsprozess abhängt, und dass große Partikelanzahlkonzentrationen von über 10^5 Partikeln/ cm^3 auftreten können. Feine und ultrafeine Partikel können beispielsweise auch beim Betrieb von Kaminen und Öfen freigesetzt werden.

5.1 Rauchen

Rauchen ist eine bedeutende anthropogene und zeitlich variierende Quelle von UFP in Innenräumen. Je nach dem zu untersuchenden Szenario lassen sich leicht Partikelanzahlkonzentrationen von mehr als $> 10^5$ Partikeln/ cm^3 erzeugen [4, 5]. Der Gebrauch von elektronischen Zigaretten (E-Zigaretten) führt ebenfalls zu einem Anstieg der Innenraumluftkonzentration von UFP und $\text{PM}_{2,5}$ [6].

5.2 Kochen

Kochvorgänge verschiedener Art (z. B. Backen, Braten, Frittieren und Toasten) können zu einem sehr starken Anstieg der Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel führen ($> 10^5$ Partikel/ cm^3). Dies kann jedoch je nach Art der Tätigkeit, Energiezufuhr, Nahrung, Lüftungsbedingungen und Raumgeometrie stark variieren [7, 8].

5.3 Partikelbildung – Bildung von sekundärem organischem Aerosol (SOA)

Chemische Reaktionen der Gas- und Aerosolphase können für die Bildung neuer SOA und für die Veränderung bestehender Partikel in Innenräumen verantwortlich sein. SOA bilden sich hauptsächlich in Gegenwart von ungesättigten Verbindungen (z. B. Monoterpenen) und Ozon, Stickstoffoxiden und/oder Hydroxylradikalen [9]. Auch das Nutzerverhalten ist ebenfalls von großer Bedeutung; so kann z. B. die Verwendung von chemischen Reinigungsmitteln eine erhebliche Menge an SOA-Partikeln erzeugen [10].

5.4 Außenluft

UFP gelangen auch von außen in den Innenraum, insbesondere durch Infiltrations- und Lüftungsprozesse. Typische Außenluftquellen sind Emissionen aus dem Straßenverkehr, Verbrennungsprozesse aller Art und Industrieemissionen. Die photochemisch induzierte Sekundärbildung kann ebenfalls eine relevante Quelle in der Außenluft sein. Bei längerer Belüftung gleichen sich die Innen- und Außenkonzentrationen in der Regel an. Nach der Belüftung ändert sich die Konzentration erneut aufgrund der vorherrschenden Quellen, Senken und der Dynamiken.

5.5 Sonstige Quellen

Beim Betrieb von Bürogeräten mit Laserdruckfunktion (Drucker, Kopierer, Multifunktionsgeräte) werden Partikel mit einem Durchmesser von bis zu etwa 300 nm freigesetzt. Kommerzielle und private 3D-Drucker (z. B. Fused-Filament-Fabrication-Drucker), die sich zunehmender Beliebtheit erfreuen, verarbeiten Kunststofffilamente in typischen Zeiträumen von bis zu mehreren Stunden zu 3D-Objekten. Feine und ultrafeine Partikel werden in die Umwelt emittiert. Geräte der unteren und mittleren Preisklasse sind in der Regel nicht mit Filtern ausgestattet [11]. UFP und feine Partikel unterschiedlicher Art, Menge und Größenverteilung entstehen auch bei der Verarbeitung von Sprühfarben und Lacken sowie bei der Materialbearbeitung, z. B. beim Schleifen, Sägen oder Bohren während Renovierungsarbeiten und Heimwerkertätigkeiten. Reinigungsarbeiten, insbesondere Staubsaugen, können ebenfalls zu einer erhöhten Freisetzung von UFP führen, wenn Geräte ohne wirksame Filterung verwendet werden. Solche Emissionen sind situationsspezifisch und hängen in hohem Maße von den verwendeten Materialien, Produkten und Geräten sowie von Umfang und Häufigkeit der Tätigkeit ab.

6 Dynamik von ultrafeinen Partikeln in Innenräumen

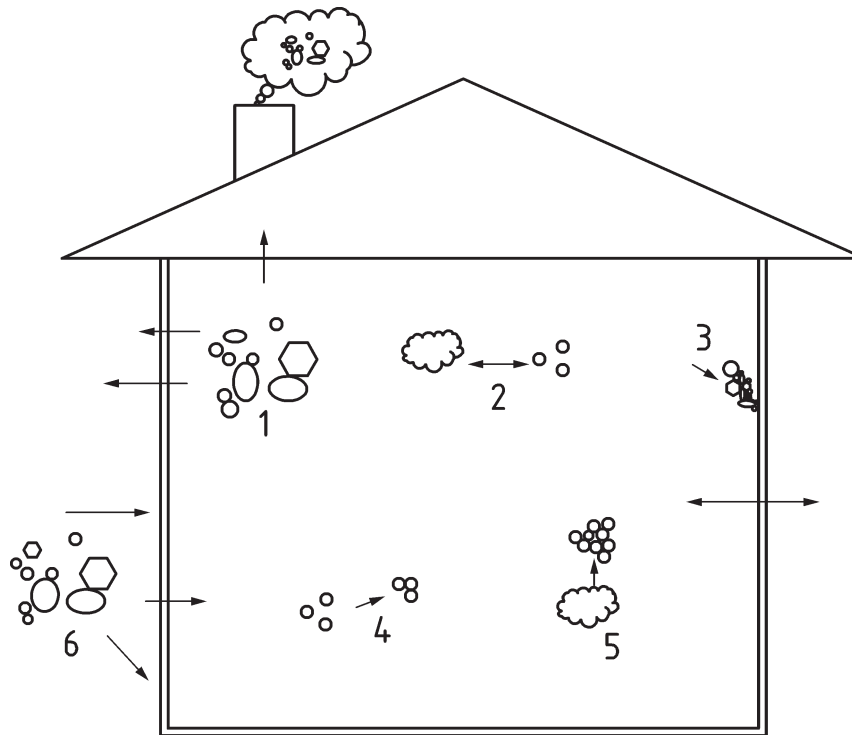
Neben den in Abschnitt 5 beschriebenen Quellenemissionen von ultrafeinen Partikeln gibt es verschiedene dynamische Prozesse, die das Messergebnis beeinflussen können. Partikelkonzentrationen und Partikelgrößenverteilungen in Innenräumen können in der Tat einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen.

Verantwortlich hierfür sind:

- die Anzahl der möglichen Emissionsquellen, ihre räumliche Anordnung und zeitabhängige Emissionsmuster;
- der Beitrag der von außen eindringenden Partikel und der damit verbundenen Einflussfaktoren wie Umweltbedingungen (Außenluftqualität, Meteorologie) und Gebäudebedingungen (Lüftungsbedingungen, Lüftungssysteme mit und ohne Filterung, Konstruktion, Dichtheit, Lage des Objekts, Fußboden);
- Mechanismen des Partikeltransports (Aerosolverdünnung, Sedimentation, Resuspension, Thermophorese und Diffusion);
- die laminare oder turbulente Luftbewegung und Luftdurchmischung im Raum;
- Temperatur und Luftfeuchte;
- Umwandlung durch chemische (Oxidation) und physikalische Prozesse (Koagulation, Verdampfung, Rekondensation, Gas-Partikel-Aufteilung).

Die Prozesse hängen von der Konzentration, Größenverteilung und chemischen Zusammensetzung der emittierten Primärpartikel ab [12]. Im Vergleich zu größeren Partikeln verhalten sich UFP manchmal eher wie Gasmoleküle; sie folgen dem Luftstrom im Raum und werden hauptsächlich durch Diffusionsprozesse verteilt. Im Gegensatz zu größeren Partikeln sind Sedimentation und Resuspension bei UFP praktisch irrelevant. Die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Koagulationseffekte hängen stark von der Anfangskonzentration, der Größe und der Breite der Größenverteilung der Primärpartikel ab. In räumlich begrenzten Bereichen mit sehr hoher Anzahlkonzentration (stromabwärts von einer Quelle) kann beispielsweise die Koagulation von Primärpartikeln wesentlich schneller erfolgen als nach homogener Verteilung der Partikel über das gesamte Raumvolumen mit entsprechend geringerer Anzahlkonzentration. Bei einer Anzahlkonzentration unter etwa $10\,000\text{ cm}^{-3}$ treten Koagulationseffekte in der ultrafeinen Partikelfraktion in der Regel erst nach einigen Stunden auf [13].

Diese Aspekte sollten bei der Planung der Messstrategie und auch bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden, z. B. durch Messung und Analyse des Zeitverhaltens eines Aerosols oder verschiedener Aerosolgrößenfraktionen über eine längere Zeit. Allgemein sollte berücksichtigt werden, dass Aerosolgrößenfraktionen auch außerhalb des Messbereichs der verwendeten Geräte vorhanden sein können.



Legende

- 1 Exfiltration
- 2 Phasenübergang
- 3 Ablagerung
- 4 Koagulation
- 5 Formation
- 6 Infiltration

Bild 2 — Dynamische Prozesse, die die Partikelbelastung in Innenräumen beeinflussen (nach [2])

6.1 Eintritt und Entfernung

Da eine Gebäudehülle nie ganz dicht ist, gelangen immer Partikel aus der Außenluft in den Innenraum (Eintrag) und umgekehrt (Austrag). Diese Zu- und Abströmungen spielen eine große Rolle bei der Partikelbelastung der Innenräume und sind natürlich erhöht, wenn aktive Lüftungsanlagen in Betrieb sind. Die Infiltration von Partikeln aus der Außenluft kann durch einen größenabhängigen Penetrationsfaktor beschrieben werden, der als strukturelle Eigenschaft eines Raumes oder Gebäudes bezeichnet wird [14].

6.2 Ablagerung

Der Hauptmechanismus für die Ausfällung oder Ablagerung von UFP auf Oberflächen ist der Transport durch Diffusion [15]. Bei rein laminarer Strömung geschieht die Ablagerung auf Oberflächen relativ langsam. In der Praxis führen jedoch Luftströmungen und raue Oberflächen zu Turbulenzen und zu einem erheblichen Anstieg der Ablagerungsrate im Vergleich zum laminaren Fall. Außerdem steigt die Ablagerungsrate mit abnehmendem Partikeldurchmesser.

6.3 Partikelbildung, Phasenübergang und Koagulation

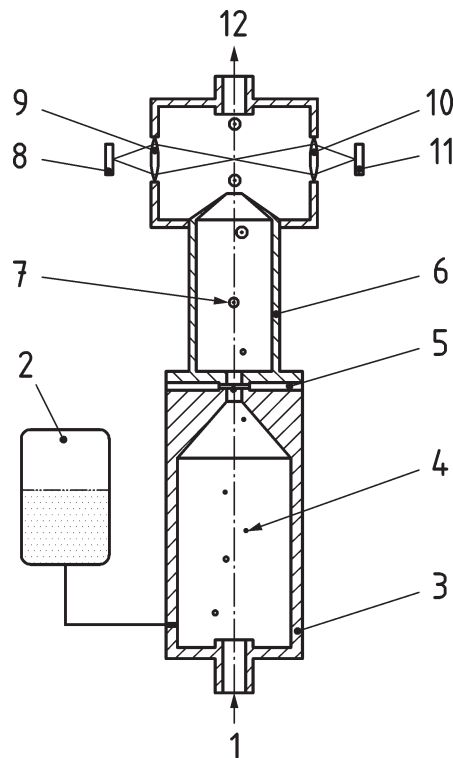
In Innenräumen können Partikel durch chemische und physikalische Prozesse neu gebildet werden. Nukleation, Kondensation und Koagulation können dabei eine Rolle spielen. Umgekehrt können Partikel auch wieder in gasförmige Bestandteile umgewandelt werden. Die Koagulation ist ein Prozess, der bei hohen

Partikelanzahlkonzentrationen und turbulenten Strömungsbedingungen besonders effektiv ist. Daher können Anzahl und Größenverteilung je nach Entfernung zu einer Partikelquelle unterschiedlich sein.

Die Resuspension von UFP wird nicht häufig beobachtet. Wenn UFP auf eine Oberfläche (z. B. eine Wand, Möbel usw.) auftreffen, sind sie üblicherweise dauerhaft mit dieser Oberfläche verbunden.

7 Messprinzip

In einem CPC werden die Partikel durch Verdampfen einer Arbeitsflüssigkeit vergrößert, die sich übersättigt und auf den Primärpartikeln kondensiert, um größere Tröpfchen zu bilden, die dann mit Hilfe von gestreutem Licht nachgewiesen werden [16]. Diese Bauform ist notwendig, da UFP-Partikel zu klein sind, um von einem optischen Instrument direkt erfasst zu werden.



Legende

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 Aerosoleintritt | 7 Tröpfchen (nicht maßstabsgetreu) |
| 2 Verdampfungssubstanz-Vorratsbehälter | 8 Lichtquelle |
| 3 beheizter Sättiger | 9 Beleuchtungsoptik |
| 4 Nanopartikel (nicht maßstabsgetreu) | 10 Aufnahmeoptik |
| 5 thermoelektrische Kühl- und Heizvorrichtung | 11 Fotodetektor |
| 6 Kondensator | 12 Aerosolauslass |

Bild 3 — Beispiel einer CPC-Konstruktion (siehe ISO 27891)

7.1 Beschreibung des Messprinzips

7.1.1 Arbeitsfluid

Um das Kondensationswachstum von Partikeln in Gang zu setzen, muss ein Mindest-Sättigungsverhältnis bezüglich eines kondensierbaren Dampfs vorhanden sein.

Typische in CPCs verwendete dampfförmige Substanzen sind Alkohole, z. B. n-Butanol, da eine Sättigung leicht erreicht werden kann.

Allerdings sollte der Aspekt der Toxizität in Innenräumen berücksichtigt werden, und n-Butanol wird als möglicherweise schädlich angesehen, wenn es über einen längeren Zeitraum eingeatmet wird. Außerdem haben n-Butanol-CPCs einen sehr starken Geruch.

Aus diesem Grund werden Isopropanol-CPCs als bessere Lösung für die Innenraumüberwachung angesehen. Dennoch können alle Alkohol-CPCs verwendet werden, sofern Maßnahmen zur Filterung der Abgase und zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen ergriffen werden (z. B. Verwendung von Kohlenstoffabscheidern oder anderen Emissionsabscheidungssystemen).

Um dieses Problem zu vermeiden, werden in Innenräumen auch regelmäßig CPCs eingesetzt, die Wasser als Arbeitsmedium verwenden. Jedoch werden stark hydrophobe Partikel möglicherweise nicht korrekt gezählt [17], und bei der Verwendung von Wasser-CPCs sollte besondere Vorsicht angewandt werden, um ein korrektes Ergebnis sicherzustellen (siehe Anhang C). Wasser-CPCs unterscheiden sich in ihrer Konstruktion von Alkohol-CPCs. Da die Diffusion von Wasserdampf schneller geschieht als der Wärmetransport, kann die Übersättigung in einem CPC mit Wasser nicht durch Wandkühlung herbeigeführt werden. Daher wird das Aerosol in einen beheizten Bereich mit feuchten Wänden eingeführt.

7.1.2 Minimale Nachweisgröße

Die Anzahlkonzentration der vergrößerten Tröpfchen ist gleich der Anzahlkonzentration der Primärteilchen (Kondensationskeime) mit einer Größe, die größer ist als der Kelvin-Durchmesser, der durch die im Messgerät erreichte Übersättigung bestimmt wird. Die minimale Nachweisgröße ist daher eine intrinsische Eigenschaft des Messgeräts und könnte das finale Zählergebnis wesentlich beeinflussen. Ein Vergleich zwischen Geräten mit unterschiedlichen D_{50} ist ohne zusätzlichen experimentellen Aufwand nicht möglich. Die untere Nachweisgrenze eines CPC wird in der Regel durch die Differenz zwischen Sättiger und Kondensator gesteuert und sorgfältig auf einem konstanten Niveau gehalten.

ANMERKUNG 1 Viele CPCs können Partikel bis hinab zu einer Größe von 5 nm erkennen. Alkohol-CPCs, die für den kleinen Größenbereich optimiert sind (UF-CPCs), verwenden dieselbe Partikelzähltechnik wie herkömmliche CPCs, sind aber weiter optimiert, um sehr kleine Partikel effektiver zu vergrößern und Verluste zu verringern, was einen Nachweis bis hinunter zu einer Größe von 3 nm ermöglicht. Um den erkennbaren Größenbereich eines Alkohol-CPC zu erweitern, wird eine Vergrößerungsstufe (en: Size Enhancer Stage, SES) vorgeschaltet. Durch die Verwendung von Diethylenglykol (DEG), einem Arbeitsfluid mit niedrigem Dampfdruck und hoher Oberflächenspannung, können selbst extrem kleine Kerne bis hinab zu einer Größe von 1 nm vergrößert und gezählt werden [18]. Bei der neuesten Konstruktion von Wasser-CPCs wird vor dem Eintritt in den Heizbereich ein zusätzlicher Konditionierungsabschnitt eingefügt, in dem das Aerosol bei Umgebungstemperatur auf 100 % relative Feuchte gebracht wird, um den Zustand des Aerosols besser zu definieren und die Zähleffizienz für verschiedene Aerosolmaterialien bis hinab zu einer Größe von etwa 1 nm zu verbessern [18]. Das Ausweiten der Empfindlichkeit auf kleinere Größen erhöht auch die Kosten des Messgeräts, kann aber einen Einblick in die Prozesse der Partikelbildung geben.

Für dieses Dokument wurden CPCs mit einem D_{50} -Wert von 10 nm als Referenz ausgewählt, da dieser Wert als künftiger Konsens für alle Überwachungsmaßnahmen im Zusammenhang mit der Luftqualität gelten dürfte.

ANMERKUNG 2 CEN/TS 16976, die Referenznorm in Europa zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration atmosphärischer Aerosole im Außenbereich, wird derzeit überarbeitet. Der derzeit verwendete Referenzwert von 7 nm wird in dem überarbeiteten Dokument auf 10 nm erhöht.

ANMERKUNG 3 Im Automobilsektor wird derzeit ein D_{50} -Wert von 23 nm verwendet, aber immer mehr epidemiologische Studien drängen darauf, diesen Wert in künftigen Vorschriften auf 10 nm zu senken, da ein großer Teil der Motoremissionen derzeit noch vernachlässigt wird. Dies wird auch zu einer besseren Einschätzung der tatsächlichen Auswirkungen des Automobilsektors auf die Luftqualität beitragen.

Die Verwendung ähnlicher D_{50} -Werte ermöglicht jedoch einen Vergleich der erhaltenen Ergebnisse im Innen- und Außenbereich und senkt die Betriebskosten für Hersteller und Labore. Aus diesem Grund ist auch die Verwendung eines CPC mit $D_{50} = 7$ nm zulässig, sofern dieser Wert in der Verordnung für die

Außenluft weiterhin zulässig ist und dass das gleiche Messgerätemodell für die Bewertung der Außenluft verwendet wird.

7.1.2.1 Optischer Nachweis nach der Vergrößerung

Die durch den Kondensationsprozess entstandenen Tröpfchen werden dann durch einen Lichtstrahl transportiert. Das von den Tröpfchen gestreute Licht wird von einer Empfangsoptik unter einem definierten Raumwinkel (Empfangsapertur) gesammelt und auf einen Detektor (z. B. Fotodiode) geleitet.

7.1.2.2 Einzelnachweis

Bei niedrigen Konzentrationen durchqueren die Tröpfchen den Lichtstrahl nacheinander und erzeugen so einzelne elektrische Impulse am Detektorausgang. Aus der Zählrate dieser Impulse und der berechneten Durchflussrate lässt sich die Gesamtanzahlkonzentration der Partikel je Volumeneinheit bestimmen.

7.1.2.3 Koinzidenzkorrektur

Es besteht immer eine endliche Wahrscheinlichkeit, dass zwei oder mehr Partikel das optische Nachweissystem eines CPC in einem bestimmten Zeitintervall passieren. Die resultierenden elektrischen Impulse können je nach ihrer Größe und Form, dem zeitlichen Abstand sowie der Signalverarbeitungsmethode und -geschwindigkeit für die einzelnen Impulse nicht mehr voneinander unterschieden werden. Dieser Vorgang wird als Koinzidenzereignis bezeichnet. Mit zunehmender Konzentration der Partikel, die in den CPC gelangen, steigt natürlich die Wahrscheinlichkeit eines Koinzidenzereignisses, und der Koinzidenzfehler führt zu einer systematischen Unterschätzung der tatsächlichen Partikelkonzentration.

Die meisten Hersteller geben Konzentrationsbereiche an, bei denen Koinzidenzereignisse vernachlässigt werden können (in der Regel bis zu 10^4 bis 10^5 Partikel je cm^3). Moderne CPCs verfügen über elektronische Schaltkreise, die in der Lage sind, dies automatisch durch eingebaute Algorithmen (so genannte Totzeitkorrekturalgorithmen, „Einzeltähler“, „Einzeltählmodus mit kontinuierlicher Lebensdauer-Koinzidenzkorrektur“, „Korrekturmodus“ und andere Synonyme, die im Grunde alle die gleiche Bedeutung haben) bis zu einer bestimmten Grenze zu kompensieren (in der Regel bis zu 10^5 bis 10^6 Partikel je cm^3).

7.1.2.4 Photometrischer Modus

Bei höheren Partikelkonzentrationen werden nicht mehr die Einzelpulse zur Bestimmung der Partikelkonzentration, sondern das von der gesamten im Messvolumen vorhandenen Partikelpopulation gestreute Licht als analoges Signal verwendet (photometrisches Verfahren).

Da im Idealfall das Tröpfchenwachstum aufgrund von Kondensation unabhängig von der Größe der Kondensationskeime die gleiche Größe ergibt und die optischen Eigenschaften der Tröpfchen im Wesentlichen durch das kondensierende Material bestimmt werden, besteht im Prinzip ein linearer Zusammenhang zwischen diesem Photometersignal und der Partikelanzahlkonzentration.

Die Bestimmung dieses Verhältnisses erfordert jedoch eine strenge Kalibrierung, die in der Praxis nur schwer zu erreichen ist. Weiterhin führen sehr hohe Partikelanzahlkonzentrationen auch zu einer Verringerung der Dampfkonzentration durch den Kondensationsprozess. Dies führt nicht nur zu einer Nichtlinearität der Kalibrierkurve, sondern beeinflusst auch die untere Nachweisgrenze des CPC. Außerdem verändert die Verschmutzung der optischen Oberflächen das gemessene photometrische Signal.

Um Zählungen bei höheren Konzentrationen zu vermeiden, können dem CPC Verdünnungssysteme vorgeschaltet werden. Allerdings ist die Verdünnung ein weiterer Faktor, der in der Praxis kontrolliert werden muss und die Messunsicherheit erhöht.

Aufgrund dieser Effekte ist die Unsicherheit der mit dem photometrischen Modus gemessenen Anzahlkonzentration höher als die im Einzelpartikelzählmodus gemessene Konzentration.

7.1.3 Partikelgrößenverteilung

Da die endgültige Tröpfchengröße unabhängig vom anfänglichen Partikeldurchmesser ist, liefert ein CPC keine Informationen über die anfängliche Partikelgröße.

Wenn Größeninformationen erforderlich sind, sollte ein System zur Analyse der differentiellen Mobilität (en: differential, mobility analysing system, DMAS) verwendet werden. Die sich daraus ergebende Kombination wird als MPSS oder SMPS bezeichnet. Nähere Angaben sind in Anhang B enthalten.

Obwohl die Information über die Größe wichtig ist, da dieser Parameter häufig die Toxizität der Partikel bestimmt, beschränkt sich der Anwendungsbereich des vorliegenden Dokuments auf die Bestimmung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration im Größenbereich des CPC.

7.2 Minimale CPC-Anforderungen

Die in diesem Dokument verwendeten CPC sollten mit den Merkmalen und Mindestanforderungen der CEN/TS 16976 übereinstimmen. Es werden nur spezifische Empfehlungen für die häufig sehr unterschiedlichen Arbeitsfluide gegeben (siehe 7.1.1), und der D_{50} -Wert sollte idealerweise mit Silberpartikeln auf 10 nm festgelegt werden (siehe 7.1.2).

Die Zähleffizienz des CPC muss von einem angesehenen Kalibrierungslabor auf der Grundlage eines international anerkannten und zugänglichen Verfahrens rückverfolgbar kalibriert werden. Es wird empfohlen, ISO 27891 zu befolgen.

Tabelle 1 — Wesentliche CPC-Leistungskriterien [CEN/TS 16976:2016; geändert]

	Verfahrenskenngröße	Kriterien
1	Tatsächliche Durchflussrate	$\leq 5 \%$ Differenz zur Nenndurchflussrate $\leq 2 \%$ Differenz zur werkszertifizierten Durchflussrate
2	Messbereich der Anzahlkonzentration Untere Grenze Obere Grenze Dynamischer Bereich	$\leq 100 \text{ cm}^{-3}$ (basierend auf wenigstens 1 500 Partikelzählungen) $\geq 10\,000 \text{ cm}^{-3}$ (einschließlich Koinzidenzkorrektur) mindestens 3 Größenordnungen
3	Nachweisgrenze der Anzahlkonzentration	$<$ Untere Grenze des Messbereichs der Anzahlkonzentration
4	Konzentrationsansprechverhalten Neigung Linearität	$1 \pm 0,05$ alle Rückstände $< 4 \%$ des gemessenen Werts
5	Nachweiseffizienz bei geringer Partikelgröße	$D_{50} = 10 \text{ nm} \pm 1,0 \text{ nm}$ $D_{90} < 20 \text{ nm}$
6	Nachweiseffizienz (bei mittlerer Partikelgröße)	$> 95 \%$ bei $(40 \pm 10) \text{ nm}$
7	Obere Partikelgrößen-Nachweisgrenze	$> 90 \%$ Nachweiseffizienz bei $1\,000 \text{ nm} \pm 100 \text{ nm}$
8	Nullzählrate	$< 1 \text{ min}^{-1}$

	Verfahrenskenngröße	Kriterien
9	Einstellzeit	$t_{\text{rise}} < 5 \text{ s}$ $t_{\text{fall}} < 5 \text{ s}$ $\left \frac{t_{\text{rise}} - t_{\text{fall}}}{t_{\text{rise}}} \right < 10 \% \text{ oder } < 0,5 \text{ s}$
10	Abhängigkeit der Durchflussrate von der Versorgungsspannung	$\leq 5 \%$
11	Genauigkeit der Temperatur- und Drucksensorkalibrierung	$T \leq 3 \text{ K}$ $P \leq 1 \text{ kPa}$
12	Auswirkung des Ausfalls der Netzspannung	Messgeräteparameter müssen gegen Verlust abgesichert sein. Beim Wiedereinschalten der Netzspannung muss das Messgerät das Funktionieren automatisch wiederaufnehmen.

7.3 Allgemeine Probenahme-Empfehlungen

Die Messung sollte in der Mitte des Raumes in etwa 1,5 m Höhe erfolgen (siehe ISO 16000-1 und ISO 16000-34), mit Ausnahme der besonderen Empfehlungen in Abschnitt 8.

Das je Stunde extrahierte Probenahmenvolumen darf nicht mehr als 10 % des stündlichen Luftaustauschvolumens des Raums betragen. Wenn dieses Austauschvolumen unbekannt ist, darf das je Stunde extrahierte Probenahmenvolumen nicht mehr als 10 % des Raumvolumens betragen.

Größere Partikel können das optische Nachweissystem kontaminieren oder den Sättiger blockieren. Ein Vorabscheider, in der Regel ein Zyklon, sollte verwendet werden, um alle Partikel größer als 2 µm oder 3 µm zu entfernen. Dies schränkt den oberen Größenbereich des Geräts ein, hat aber Auswirkungen auf die Gesamtanzahl, die viel geringer ist als die Gesamtmessunsicherheit des Verfahrens.

Partikelverluste in einer Probenahmeleitung durch Diffusion, Impaktion oder elektrostatische Aufladung müssen berücksichtigt werden. Impaktionsverluste können bei kleinen Partikeln in der Regel vernachlässigt werden. Andere Verluste können minimiert werden, indem a) die Probenahmeleitungen kurz gehalten werden, b) ein hoher Probendurchfluss hergestellt wird und c) elektrisch leitfähige Materialien (z. B. mit Ruß gefüllter Silikongummi, nichtrostender Stahl) für die Probenahmeleitung verwendet werden. In den meisten Fällen ist keine Probenahmeleitung erforderlich und die Probenahme könnte einfach am Einlass des Geräts erfolgen. Diese Lösung sollte wann immer möglich verwendet werden. Zu weiteren Informationen siehe [32].

8 Messstrategie

Die zu befolgende Messstrategie bei der Messung von UFP in Innenräumen hängt stark vom Ziel der Untersuchung ab.

Typische Ziele sind im Folgenden aufgeführt:

- Durchschnittliche Raumkonzentration
- Quellenuntersuchung / -identifizierung
- Infiltration aus dem Freien oder aus angrenzenden Räumen
- Messung in Fahrzeuginnenräumen

— Erfolgskontrolle von Minderungsmaßnahmen

Abhängig von der jeweiligen Messaufgabe werden in den folgenden Unterabschnitten Empfehlungen zur Planung einschließlich Messort, Häufigkeit und Zeitpunkt der Messung, Dauer und Häufigkeit der Messung beschrieben.

Alle ergänzenden Informationen, die für eine korrekte Interpretation des Endergebnisses erforderlich sind, müssen ebenfalls gemessen und in den Bericht aufgenommen werden.

Unter anderen werden in der Regel die folgenden Informationen angegeben:

- Versuchsleiter, Informationen über das verwendete Messgerät, Uhrzeit und Tag der Probenahme;
- Raumeigenschaften (feste Einbauten, z. B. Bodenbelag, Wandverkleidung, auch Größe, Fenstertyp, Raumtextilien, Klimaanlage, Heizquelle ...);
- wichtigste im Raum vorhandene Geräte / Quellen (z. B. Kühlschränke, Herde, TV-Geräte, Computer, Drucker, Toaster, Staubsauger, Kamine) mit Angabe des Betriebsstatus;
- mögliche Quellen in angrenzenden Räumen;
- kleiner Plan des Raums und der angrenzenden Räume, falls nützlich, mit der Lage der Probenahmepunkte und des Hauptgeräts;
- Raumbelüftung (Luftdichtheit der Gebäudehülle);
- tatsächliche Belüftungsanordnung. Die Nutzungs- und Belüftungsbedingungen können durch gleichzeitige Messungen der CO₂-Konzentration dokumentiert werden. Die Auswirkung des Öffnens von Türen und Fenstern ist nicht wirklich kritisch, außer wenn dadurch ein starker Luftstrom (Wind) entsteht. Tatsächlich halten klassische Gebäudehüllen UFP-Partikel nicht auf;
- Anzahl der im Raum anwesenden Personen und deren Tätigkeit;
- Vorkommen spezieller, zu bestimmten Zeiten stattfindender Tätigkeiten (Putzen, Kochen, Rauchen, Drucken, abbrennen von Kerzen ...);
- Innenraumluf-Bedingungen (z. B. Temperatur, Druck, Luftfeuchte);
- Außenbedingungen (z. B. Windrichtung, Temperatur, Feuchte, Sonneneinstrahlung, Niederschlag). UFP-Parallelmessungen im Freien werden immer empfohlen;
- Standort des Gebäudes und Vorhandensein von anthropogenen Quellen im Freien (z. B. Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr, Industrie, Handel, Landwirtschaft, Grillen, Rauchen) oder natürlichen Quellen (z. B. photochemische Partikelbildung, Waldbrand).

8.1 Durchschnittliche Raumkonzentration

Es könnten drei verschiedene Betriebszustände definiert werden:

- a) Ruhezustand ohne Aktivität: Keine Bewohner und keine Aktivitäten. Alle im Raum vorhandenen Geräte mit einem möglichen Einfluss auf die Messung werden ausgeschaltet oder deaktiviert.
- b) Ruhezustand mit Geräteaktivität: Keine Bewohner und Aktivitäten, aber mit Betrieb aller fest installierten und/oder ständig betriebenen Geräte (z. B. Lüftungsanlage, Gasheizung, Kühlschränke, Server).

- c) Aktiver Zustand: Während der Untersuchung sind Bewohner im Raum anwesend, Tätigkeiten finden statt und die Geräte sind in Betrieb.

Im Bericht müssen Informationen über den aktuellen Betriebszustand und alle während der Untersuchung eingetretenen Änderungen enthalten sein.

8.1.1 Ruhezustand ohne Aktivität

Es sollte wenigstens eine einstündige Messung in der Mitte jedes untersuchten Raumes durchgeführt werden. Wenn nicht für alle Punkte im gleichen Raum homogene Bedingungen garantiert werden können, sollten zusätzliche Standorte untersucht und der Durchschnitt aller Messergebnisse als durchschnittliche Raumkonzentration verwendet werden. Wird mehr als ein Punkt im selben Raum gemessen, so ist an jedem Ort eine geringere Probenahmedauer bis hinab zu 15 min zulässig, doch müssen die Probenahmedauern aller im selben Raum untersuchten Punkte zusammen mindestens eine Stunde betragen.

8.1.2 Ruhezustand mit Geräteaktivität

Wenn das Ziel ist, den Raum als Ganzes zu charakterisieren, gilt das gleiche Verfahren wie für den Ruhezustand ohne Aktivität (siehe 8.1.1). Alle Geräte sollten in den üblichen Betriebsmodus versetzt werden und es sollte darauf geachtet werden, unerwünschte Störungen zu vermeiden. Wenn einige Tätigkeiten zyklisch ablaufen, sollte die Mindestprobenahmedauer von einer Stunde ausgedehnt werden, bis eine ganze Anzahl von Zyklen enthalten ist.

Wenn das Ziel ist, den Einfluss bestimmter Geräte hervorzuheben, sollten zwei separate Proben genommen werden, wobei alle anderen Raumparameter konstant gehalten werden sollten (siehe 8.2).

8.1.3 Aktiver Zustand

Die Anzahl der Probenahmen, deren Orte und die minimale Probenahmedauer hängen von der Nutzung des Raums und dem Zweck der Messung ab. In den meisten Fällen werden mehrere Messungen durchgeführt, um die Auswirkungen einer bestimmten Aktivität oder bestimmter Quellen in dem untersuchten Raum zu ermitteln.

8.2 Quellenuntersuchung / -identifizierung

Es gibt unterschiedliche Innenraumquellen von UFP. ISO 16000-34 beschreibt das Verfahren zur Zuordnung und Bewertung einzelner Innenraumquellen. Die Anzahl und die Lage der Probenahmestellen werden ebenfalls in diesem Dokument festgelegt, wobei die Art des Raumes und die zu erwartenden Aktivitäten der potenziellen Aerosolquellen berücksichtigt werden.

Dieses Dokument befasst sich ausschließlich mit der Messung der Gesamtanzahlkonzentration von Partikeln im Größenbereich des CPC als eigenständiges Messgerät. Die meisten Innenraumquellen für luftgetragene Partikel emittieren Partikel in Größenbereichen, die von CPCs nicht erkannt werden können. Für eine vollständige Untersuchung der Quellen ist oft der Einsatz weiterer geeigneter Techniken, wie sie in ISO 16000-34 beschrieben sind, erforderlich.

Die Quellenuntersuchung kann durch langsames Bewegen des CPC im untersuchten Raum durchgeführt werden. Normalerweise nimmt die Konzentration zu, je näher die Messung an der Quelle stattfindet.

Wenn eine bestimmte Quelle identifiziert wurde und das Ziel darin besteht, die relative Auswirkung dieser einzelnen Quelle auf die Gesamtkonzentration im Raum zu bestimmen, sollte eine spezifische Messung mit einem CPC in der Nähe der Quelle durchgeführt werden. Es sollten Messungen mit und ohne den Betrieb dieser spezifischen Quelle durchgeführt werden, wobei versucht werden sollte, dazwischen alle anderen Quellen und Parameter konstant zu halten. Jede einzelne Messung sollte mindestens eine Stunde dauern. Wenn die untersuchte Quelle nicht eine Stunde lang in Betrieb bleiben kann, kann die Probenahmedauer so verlängert werden, dass die Quelle insgesamt eine Stunde lang aktiv ist. Zeiten der Inaktivität können dann

bei der Datenverarbeitung entfernt werden. Bei intermittierenden Quellen, die wegen ihres geringen Auftretens innerhalb eines Arbeitstages nicht innerhalb einer Stunde gemessen werden können, ist eine kürzere Probenahmedauer zulässig, doch sollten die Anwender bei der Interpretation der Ergebnisse besonders vorsichtig sein. In jedem Fall sollten alle erfassten Dauern angegeben werden.

Die Aufrechterhaltung stabiler Bedingungen im Raum während der Messungen erfordert besondere Sorgfalt. Es wird nicht empfohlen, andere Quellen zu entfernen, um diese Stabilität zu erreichen, da Kreuzinteraktionen möglich und Teil der Untersuchung sind. Während Innenraumquellen ein- und ausgeschaltet werden können, ist dies bei Aerosolbeiträgen von außen nicht möglich. Aus diesem Grund werden parallele Außenmessungen immer empfohlen, um ein gewisses Maß an Stabilität sicherzustellen.

Wenn der Beginn und das Ende der Partikelfreisetzung exakt bestimmt werden können (z. B. beim Einschalten von Geräten), sollte die Messung im Voraus gestartet werden (z. B. 15 min bis 30 min), um den Zustand bei Inaktivität zu erfassen. Um das Abklingverhalten der Partikelkonzentrationen nach Beendigung der Partikelfreisetzung abschätzen zu können, sollte die Messung lange genug fortgesetzt werden, bis keine Änderung der Konzentration mehr erkennbar ist. Bei der Verwendung elektrischer Geräte kann die Freisetzung von Partikeln fortgesetzt werden, bis das Gerät vollständig abgekühlt ist.

Es wird empfohlen, die Messung zu wiederholen, um die Zuverlässigkeit und Vergleichpräzision der Ergebnisse sicherzustellen. Im Falle von Mehrfachmessungen sollte jedes Ergebnis separat angegeben und der Durchschnittswert für die Bewertung der Partikelanzahlkonzentration verwendet werden.

8.3 Infiltration aus dem Freien oder aus angrenzenden Räumen

Der Straßenverkehr oder benachbarte Industrieanlagen können zu hohen UFP-Konzentrationen in Innenräumen beitragen. Quellen hoher Emissionen (z. B. Kochen, Heizungsanlage, Druckgeräte) in Räumen mit gemeinsamem Luftaustausch können den untersuchten Raum ebenfalls beeinflussen.

Gebäudehüllen verhindern nicht notwendigerweise die Infiltration von UFP, aber die Beziehung ist häufig komplex, insbesondere wenn eine mechanische Belüftung vorhanden ist. Es sind Messungen erforderlich, um den Einfluss dieser wichtigen Quelle zu quantifizieren.

Bei der Untersuchung des Außenluftbeitrags sind gleichzeitige Messungen der Innen- und Außenluft zwingend erforderlich, da UFP-Werte für außen oft instabil sind und direkt durch Wind oder andere Parameter beeinflusst werden. Bei der Untersuchung von Einträgen aus einem anderen Raum und wenn die Konzentration in diesem Raum stabil genug ist, werden gleichzeitige Messungen empfohlen, sind aber nicht zwingend vorgeschrieben.

Es sollte außerdem beachtet werden, dass schnelle Änderungen der Konzentration in der Außenluft oder in benachbarten Räumen nicht immer gleichzeitig und in gleichem Maße im untersuchten Raum gemessen werden.

Zu diesem Zweck müssen zwei gleichwertige CPCs verwendet werden (gleiche Marke und gleiches Modell). Vorherige Parallelmessungen sind auf eine Art erforderlich, dass vergleichbare Ergebnisse zwischen ihnen sichergestellt werden. Beide CPCs werden im untersuchten Raum für mindestens 15 Minuten nahe nebeneinander platziert. Dann wird die Durchschnittskonzentration beider Systeme bestimmt. Die Systeme sollten überprüft werden, wenn die Differenz größer ist als die angegebene Messunsicherheit für die verwendete Betriebsart.

Partikelverluste können zu einer erheblichen Unterschätzung der tatsächlichen Konzentration führen. Diese Verluste sollten berücksichtigt werden, wenn die mit verschiedenen Probenahmeleitungen erzielten Ergebnisse verglichen werden, was beim Vergleich von Ergebnissen im Innen- und Außenbereich durchaus üblich ist. Diese Verluste sollten durch eine Vergleichsprüfung grob abgeschätzt und im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird eine vorherige Messung während 15 Minuten im untersuchten Raum mit und ohne Anschluss des CPC an die Probenahmeleitung empfohlen.

Der Probenahmeort für die Außenluft sollte möglichst nahe an der Messstelle im Innenraum liegen, damit die in den zu betrachtenden Innenraum eindringende Außenluft untersucht und bewertet werden kann. Ein Abstand von ungefähr 1 m zum Gebäude sollte eingehalten werden, um Wandeinflüsse zu vermeiden. Bei der Verwendung von Probenahmeleitungen muss darauf geachtet werden, dass die gerätespezifischen Eigenschaften nicht verändert werden. (z. B. Druckverlust, Abtrennung, Elektrostatik). Der Probenahmeort im benachbarten Raum sollte repräsentativ für die mittlere Konzentration des Raumes sein, aber während der gesamten Messdauer an der gleichen Stelle bleiben.

Befinden sich die Messräume nicht im Erdgeschoss, sollte die Außenmessung möglichst auf gleicher Höhe stattfinden. Dieser Punkt ist besonders wichtig, wenn sich der untersuchte Raum auf der Straßenseite des Gebäudes befindet, jedoch wird dies auch für Zimmer empfohlen, die zum Hof oder Garten hin gelegen sind. Im Falle eines größeren Bürogebäudes können Außenluftmessungen an repräsentativen Bereichen der Gebäudefassade durchgeführt werden.

Die Messung der Außenluft wird direkt von den Wetterbedingungen beeinflusst. Die Wetterbedingungen müssen aufgezeichnet werden, und die Messkampagne muss bei Regen unter Bedingungen, die das Endergebnis eindeutig beeinflussen, verschoben werden.

8.4 Messung in Fahrzeuginnenräumen

Der Verkehr ist eine Hauptquelle von UFP-Emissionen. Eine Fahrzeugkabine verhindert die Exposition nicht. Die im Auto oder in öffentlichen Verkehrsmitteln verbrachte Zeit kann im Vergleich zu anderen täglichen Aktivitäten eine hohe Expositionsdauer darstellen, insbesondere in Ballungsgebieten.

Die Messgeräte sollten für den Betrieb in einer Fahrzeugkabine geeignet sein. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Risiko des Auslaufens von Arbeitsfluid vermieden wird und dass genügend Arbeitsfluid für die Dauer der Messungen vorhanden ist. Der CPC muss fest mit dem Fahrzeug verbunden sein. Es sollte besonders darauf geachtet werden, dass auch bei Erschütterungen oder Unfällen das Risiko einer Beschädigung des Fahrzeugs oder einer Verletzung der Insassen vermieden wird.

Die Platzierung des Einlasses sollte angegeben werden. Die Verwendung einer geringeren Betriebsdurchflussrate kann notwendig sein, um die Größe der Pumpe und die Geräuscentwicklung zu verringern und den CPC tragbarer auszuliegen. Die Probenahmeleitung sollte so kurz wie möglich sein und aus leitfähigem Material bestehen, um Verluste zu vermeiden. Dieser Punkt ist wichtig, da die Verluste in der Leitung bei geringeren Durchflussraten zunehmen.

Die Verwendung einer hohen Probenahmerate (z. B. 1 Hz) wird empfohlen, um mögliche schnelle Konzentrationsschwankungen während der Fahrt präziser verfolgen zu können.

Die Probenahmedauer hängt vom Zweck der Messung ab. In der Regel sollte die Dauer lang genug sein, um mehrere Situationen abzudecken. Im Falle von intermittierenden Ereignissen, die die Ergebnisse erheblich beeinflussen können, sollten diese Episoden bei der Datenauswertung gesondert untersucht werden. Es gilt als gute Praxis, die Messung mehrmals zu wiederholen, um einen korrekten Wert sicherzustellen.

Es wird empfohlen, die Position des Fahrzeugs über GPS aufzuzeichnen, um Episoden mit hohen Messwerten mit einer bestimmten Situation (z. B. Stau, rote Ampel) in Verbindung bringen zu können. Das Schreiben eines Ereignisberichts oder der Einsatz einer Windschutzscheibenkamera kann ebenfalls nützlich sein.

8.5 Erfolgskontrolle von Minderungsmaßnahmen

Um die Wirksamkeit einer Reduzierungsmaßnahme zu verdeutlichen, werden häufig spezielle Kampagnen organisiert. Zwei unterschiedliche Szenarien sind möglich. Die erste entspricht einigen Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen, die leicht ein- oder ausgeschaltet werden können (z. B. Klimaanlage mit HEPA-Filtern). Die zweite entspricht dauerhaften infrastrukturellen Maßnahmen zur Verringerung (z. B. Bau einer Mauer, Verwendung eines bestimmten Materials, Verlagerung einer bestimmten Quelle ...).

Wenn die Abhilfemaßnahmen leicht abgeschaltet werden können, sollte die Quantifizierung mit und ohne diese Maßnahmen zur Verringerung durchgeführt werden, wobei das gleiche Verfahren wie in Abschnitt 8.2 angewandt wird. Vor der Umsetzung dauerhafter Abhilfemaßnahmen (d. h. der Befestigung der Infrastruktur) muss eine erste Untersuchung durchgeführt und mit den Ergebnissen verglichen, die nach deren Umsetzung erzielt werden. Beide Messungen sollten nach demselben Protokoll und nach Abschnitt 8.1 durchgeführt worden sein.

Es ist besonders darauf zu achten, alle Parameter und Quellen (d. h. CPC-Leistung, Aktivitäten, Vorhandensein von Quellen, äußere Bedingungen) zwischen den beiden Messungen so konstant wie möglich zu halten. In der Praxis kann dieser Idealzustand nie erreicht werden, und deshalb ist bei der Interpretation der Ergebnisse besondere Vorsicht geboten.

9 Qualitätssicherung und Bewertung der Messunsicherheit

In diesem Abschnitt werden die Leistungskriterien für den CPC und den Messaufbau (z. B. Probenahmeleitung, Probenahme-Durchflussrate und daraus resultierende Probenahmeverluste), die das Ergebnis beeinflussen, dargelegt.

9.1 Allgemeines

Die Messunsicherheiten werden nicht nur durch das Zählinstrument, sondern auch durch mögliche Verluste im Probenahmesystem beeinflusst. Relevante Faktoren, die sich auf die Messunsicherheiten auswirken, sind oben in diesem Dokument aufgeführt (z. B. 7.3, 8.3, 8.4).

Die Unsicherheitsbewertung, die sich aus der Kalibrierung durch den Hersteller oder durch Dritte ergibt, sollte angegeben werden.

9.2 Messgeräteparameter

Das ordnungsgemäße Funktionieren der CPC-Komponenten muss durch Messgeräteanzeigen und Statusmeldungen überprüft werden. Diese werden in den meisten Fällen automatisch gemeinsam mit den Daten in Protokolldateien dokumentiert, die von der Software des Messgeräts erstellt werden. Die CPC-Probendurchflussrate ist der einflussreichste Parameter für eine Messung der Partikelanzahlkonzentration. Das Durchflusssteuerungssystem des CPC sollte entsprechend den Empfehlungen der ISO 27891 kalibriert und auf das Internationale Einheitensystem (SI) rückführbar sein.

Mehrere CPC-Durchflusssteuerungssysteme berücksichtigen eher Standarddurchflüsse als volumetrische Durchflüsse. Ein Standarddurchfluss bezieht sich immer auf Standardbedingungen des Durchflusssensors (T_{standard} , P_{standard}), die bei den Sensorherstellern nicht einheitlich definiert sind und die von den tatsächlichen meteorologischen Bedingungen erheblich abweichen können. Der volumetrische Durchfluss ist der tatsächliche Probenahmedurchfluss, der durch den CPC-Einlass bei den tatsächlichen meteorologischen Bedingungen (T , P) fließt.

Im Handbuch des Herstellers sollte nachgesehen werden, ob der vom CPC angezeigte Probendurchfluss als volumetrischer oder als Standarddurchfluss angegeben ist. Im letzteren Fall ist die Berechnung des tatsächlichen Durchflusses an der Probenahmestelle und die Korrektur der gemessenen Daten anhand der Gleichung (1) vorgeschrieben. Alle angewandten Berechnungen zur Umrechnung von Probendurchflüssen müssen im Bericht dokumentiert werden. Gleichung (1) zeigt die Umwandlung zwischen Standard- und volumetrischer Durchflussrate.

$$Q_{\text{vol}} = Q_{\text{std}} \left(\frac{T_{\text{room}}}{T_{\text{std}}} \right) \left(\frac{P_{\text{std}}}{P_{\text{room}}} \right) \quad (1)$$