

DIN CEN/TS 17434

Dieses Dokument ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 5.
ICS 13.040.20

**Außenluft –
Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen
Aerosols mit einem Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (MPSS);
Deutsche Fassung CEN/TS 17434:2020**

Ambient air –

Determination of the particle number size distribution of atmospheric aerosol using a
Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS);
German version CEN/TS 17434:2020

Air ambient –

Détermination de la distribution granulométrique de particules d'un aérosol atmosphérique à
l'aide d'un spectromètre de granulométrie à mobilité électrique (MPSS);
Version allemande CEN/TS 17434:2020

Gesamtumfang 66 Seiten

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

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TS 17434:2020) wurde in der Arbeitsgruppe WG 32 „Außenluft — Partikelanzahlkonzentration“ (Sekretariat und Obmannschaft: Deutschland) des Technischen Komitees CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ (Sekretariat: Deutschland, Obmannschaft: Vereinigtes Königreich) unter Mitwirkung deutscher Experten, die von der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) — Normenausschuss – benannt wurden, erarbeitet.

Die nationale Arbeitsgruppe (NA 134-04-02-18 UA) „Messen von Partikeln in der Außenluft — Bestimmung der Partikelanzahl“ des Fachbereiches IV „Umweltmesstechnik“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) — Normenausschuss – fungiert als Spiegelgremium für die CEN-Arbeitsgruppe CEN/TC 264/WG 32.

Technische Spezifikationen sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Eine Technische Spezifikation ist das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens von DIN noch nicht als Norm herausgegeben wird.

Zur vorliegenden Technischen Spezifikation wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Erfahrungen mit dieser Technischen Spezifikation sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an krdl@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe abgerufen werden;
- oder in Papierform an die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) — Normenausschuss; Postfach 10 11 39; 40002 Düsseldorf.

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

Deutsche Fassung

**Außenluft —
Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des
atmosphärischen Aerosols mit einem
Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (MPSS)**

Ambient air —

Determination of the particle number size distribution
of atmospheric aerosol using a Mobility Particle Size
Spectrometer (MPSS)

Air ambiant —

Détermination de la distribution granulométrique de
particules d'un aérosol atmosphérique à l'aide d'un
spectromètre de granulométrie à mobilité électrique (MPSS)

Diese Technische Spezifikation (CEN/TS) wurde vom CEN am 22. Dezember 2019 als eine künftige Norm zur vorläufigen Anwendung angenommen.

Die Gültigkeitsdauer dieser CEN/TS ist zunächst auf drei Jahre begrenzt. Nach zwei Jahren werden die Mitglieder des CEN gebeten, ihre Stellungnahmen abzugeben, insbesondere über die Frage, ob die CEN/TS in eine Europäische Norm umgewandelt werden kann.

Die CEN Mitglieder sind verpflichtet, das Vorhandensein dieser CEN/TS in der gleichen Weise wie bei einer EN anzukündigen und die CEN/TS verfügbar zu machen. Es ist zulässig, entgegenstehende nationale Normen bis zur Entscheidung über eine mögliche Umwandlung der CEN/TS in eine EN (parallel zur CEN/TS) beizubehalten.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	8
5 Atmosphärisches Aerosol	8
6 Beschreibung des Verfahrens	10
6.1 Probenahme und Konditionierung	10
6.1.1 Probenahme	10
6.1.2 Trocknung des Aerosols	11
6.2 Ermittlung der Partikelanzahlgrößenverteilung mit einem MPSS	12
6.2.1 Physikalisches Prinzip	12
6.2.2 Partikelaufladung	12
6.2.3 Mobilitätsanalyse	13
6.2.4 Dateninversion	16
6.2.5 Korrektur für Partikelverluste durch Diffusion	16
6.2.6 Korrektur für die Nachweisempfindlichkeit des CPC	17
7 Leistungskriterien des MPSS und Prüfverfahren	17
7.1 Leistungskriterien und Aufbau des MPSS	17
7.2 Prüfverfahren für die MPSS-Leistungskriterien	19
7.2.1 Tatsächlicher Aerosolvolumenstrom	19
7.2.2 Partikelgrößenbereich	19
7.2.3 Genauigkeit der Partikelgrößenkalibrierung	19
7.2.4 Genauigkeit der integrierten Partikelanzahlkonzentration	20
7.2.5 Fehlzählrate	20
7.2.6 Strömungsbedingung	20
7.2.7 Genauigkeit der Partikelanzahlgrößenverteilung	21
8 Leistungskriterien und Prüfverfahren für die Probenahme- und Konditionierungseinrichtung	21
8.1 Allgemeine Anforderungen	21
8.2 Leistungskenngrößen und -kriterien	21
8.3 Partikelverluste durch Diffusion	22
8.4 Relative Feuchte	22
8.5 Verdünnungsfaktor	22
8.6 Primärer Probenahmevolumenstrom	23
9 Messverfahren	23
9.1 Messplanung	23
9.2 Umgebungsbedingungen	23
9.3 Erstinstallation	23
9.4 Erstprüfungen am Standort	24
9.5 Berichterstattung	25
10 Qualitätskontrolle, Qualitätssicherung und Messunsicherheit	25

10.1	Allgemeines	25
10.2	Allgemeine Arbeitsanweisungen.....	26
10.3	Häufigkeit von Kalibrierungen, Prüfungen und Wartung.....	26
10.3.1	Allgemeines	26
10.3.2	Kalibrierung des Aerosolvolumenstroms (MPSS).....	27
10.3.3	Kalibrierung des Aerosolvolumenstroms (CPC).....	27
10.3.4	Kalibrierung der Feuchte-, Temperatur- und Drucksensoren	27
10.3.5	CPC-Kalibrierung.....	28
10.3.6	Prüfung der Verzögerungszeit.....	28
10.3.7	Prüfung der mittleren Fehlzählrate (CPC)	28
10.3.8	Dichtheitsprüfung	28
10.3.9	Wartung der Probenahmeeinrichtung.....	28
10.3.10	Kalibrierung des Feuchtesensors.....	28
10.3.11	Kalibrierung des Verdünnungsfaktors (falls zutreffend).....	28
10.3.12	Dichtheitsprüfung	28
10.4	Messunsicherheit	29
Anhang A (normativ) Bipolare Ladungsverteilung.....		30
Anhang B (normativ) Berechnung der Partikelverluste durch Diffusion		32
B.1	Allgemeine Gleichungen und Konstanten	32
B.2	Partikelverluste durch Diffusion in geraden Röhren mit rundem Querschnitt.....	33
B.3	Partikelverluste durch Diffusion in einem MPSS.....	34
Anhang C (informativ) Beispiel für die Berechnung der Partikelverluste durch Diffusion in einer Probenahmeeinrichtung.....		35
C.1	Beschreibung der Probenahmeeinrichtung.....	35
C.2	Lufteigenschaften und Diffusionskoeffizient	36
C.3	Verluste im primären Probenahmerohr.....	36
C.4	Partikelverluste durch Diffusion im sekundären Probenahmerohr und im MPSS.....	37
C.5	Gesamtverluste bei der Probenahme	38
Anhang D (informativ) Beispiel für den Aufbau eines MPSS.....		39
Anhang E (informativ) Verdünnungssystem.....		41
E.1	Hintergrund.....	41
E.2	Kriterien für Verdünnungssysteme.....	41
E.3	Beispiel für den Aufbau eines Verdünnungssystems.....	41
E.4	Betriebsparameter eines Verdünnungssystems.....	42
E.5	Beispiel für die Berechnung der Unsicherheit des Verdünnungsfaktors.....	44
Anhang F (informativ) Laminare Strömung		46
Anhang G (informativ) Datenberichterstattung		47
G.1	Motivation	47
G.2	Level 0 (annotierte Rohdaten)	48
G.3	Level 1 (zur endgültigen physikalischen Eigenschaft verarbeitete Daten, gegebenenfalls korrigiert, ursprüngliche zeitliche Auflösung)	48
G.4	Level 2 (Stundenmittelwerte, einschließlich der Streumaße)	48
G.5	Implementierung bei ACTRIS / EMEP / GAW	48
G.6	Daten und Metadaten auf Level 0	49
G.6.1	Daten.....	49
G.6.2	Metadaten.....	50
G.6.3	Fehlerkennzeichen	52
G.7	Daten und Metadaten in Ebene 1	52
G.7.1	Daten.....	52
G.7.2	Metadaten.....	53
G.7.3	Fehlerkennzeichen	55
G.8	Daten und Metadaten in Ebene 2	55

G.8.1 Daten 55

G.8.2 Metadaten..... 56

G.8.3 Fehlerkennzeichen..... 58

Anhang H (informativ) Atmosphärische Aerosole in Europa..... 59

H.1 Allgemeines 59

H.2 Mittlere Konzentrationen..... 59

H.3 Beispiele für Messungen 60

Literaturhinweise..... 63

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TS 17434:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Technische Spezifikation anzukündigen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Die Bedeutung von Aerosolpartikeln mit Durchmessern von $D < 1 \mu\text{m}$ für die menschliche Gesundheit sowie für ihre klimatischen Auswirkungen rückt immer stärker ins Bewusstsein. Für die Bewertung der Luftqualität scheint es notwendig, gravimetrisch ermittelte Massenkonzentrationen wie PM10 oder PM2,5 durch eine Messung der Partikelanzahlkonzentration zu ergänzen. Da ultrafeine Partikel mit Durchmessern von $D < 0,1 \mu\text{m}$ nur noch unwesentlich zur Massenkonzentration des atmosphärischen Aerosols beitragen, werden sie idealerweise mit zählenden Messverfahren ausreichender Empfindlichkeit erfasst.

Da Partikelmessgeräte die Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration und der Partikelanzahlgrößenverteilung ermöglichen, wurden zwei Technische Spezifikationen erarbeitet:

- eine für die Ermittlung der Einzelmessgröße Anzahlkonzentration (ein Maß für die „Gesamtanzahlkonzentration“ (CEN/TS 16976)) und
- eine für die Ermittlung der Anzahlkonzentrationen innerhalb einer begrenzten Anzahl von Größenbereichen (das vorliegende Dokument).

Abschnitt 5 und Abschnitt 6 enthalten allgemeine Angaben zum Verfahren und zu den erwarteten Eigenschaften der zu messenden Aerosolpartikel.

Abschnitt 7 behandelt die Leistungskriterien für MPSSs. Dies sind insbesondere die relevanten Leistungskenngrößen für diese Geräte (ohne Probenahmeeinrichtung), die zu erfüllenden Kriterien sowie die Beschreibung der entsprechenden Prüfungen. Diese Prüfungen werden im Allgemeinen von Prüfinstituten oder MPSS-Herstellern, nicht jedoch von den Anwendern durchgeführt und könnten die Grundlage für künftige Typenzulassungen dieser Geräte sein.

Abschnitt 8 beschreibt die Leistungskriterien und Prüfverfahren für die Probenahme- und Konditionierungseinrichtung. Diese Prüfverfahren können von Herstellern von Probenahmeeinrichtungen, Prüfinstituten oder Anwendern (Messnetzbetreiber) angewendet werden.

Abschnitt 9 behandelt die Anforderungen für Installation, Erstprüfungen und Kalibrierungen sowie den Betrieb eines MPSS und der Probenahmeeinrichtung an einem Messort, einschließlich routinemäßiger Wartungsarbeiten, Datenverarbeitung (einschließlich Verwendung von QA/QC-Daten) und Berichterstattung. Diese Tätigkeiten liegen im Allgemeinen in der Verantwortung der Anwender (Messnetzbetreiber), wobei Kalibrierungen, für die Prüfaerosole erforderlich sind, nur von entsprechend qualifizierten Laboratorien durchgeführt werden dürfen.

Abschnitt 10 behandelt die Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle, d. h. die während des Betriebs des MPSS und der Probenahmeeinrichtung am Messort erforderlichen fortlaufenden Prüfungen und Kalibrierungen. Diese Tätigkeiten liegen in der Verantwortung der Anwender (Messnetzbetreiber). Die wesentlichen Quellen der Messunsicherheit werden beschrieben, wobei es jedoch nicht möglich ist, in diesem Dokument die Gesamtmessunsicherheit für die nach dieser Methode ermittelten Daten zu quantifizieren.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung von Partikelanzahlgrößenverteilungen in Außenluft im Größenbereich von 10 nm bis 800 nm bei Gesamtkonzentrationen bis etwa 10^5 cm^{-3} mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Minuten. Das Standardverfahren beruht auf einem Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (MPSS), das mit einem bipolaren Diffusionsauflader sowie einem Kondensationspartikelzähler (CPC) als Detektor betrieben wird. Dieses Dokument legt die Leistungskenngrößen und Mindestanforderungen an zu verwendende Geräte und Ausrüstung fest und beschreibt Probenahme, Betrieb, Datenverarbeitung und QA/QC-Maßnahmen, einschließlich Kalibrierung.

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).

CEN/TS 16976:2016, *Außenluft — Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols*

ISO 15900, *Determination of particle size distribution — Differential mobility analysis for aerosol particles*

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:

— IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

— ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp/ui>

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

Nachweisempfindlichkeit

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

[QUELLE: CEN/TS 16976:2016, geändert]

3.3

Anzahlgrößenverteilung

Häufigkeitsverteilung der Partikelanzahlkonzentration, dargestellt als eine Funktion des Logarithmus der Partikelgröße, sodass der Bereich unter der Verteilung zwischen zwei Größen die Anzahlkonzentration für diesen Größenbereich ist

3.4

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, geändert]

3.5

Partikelanzahlkonzentration

Anzahl der Partikel je Trägergasvolumen

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

Anmerkung 2 zum Begriff: Die übliche Einheit ist cm^{-3} .

[QUELLE: ISO 27891:2015, geändert]

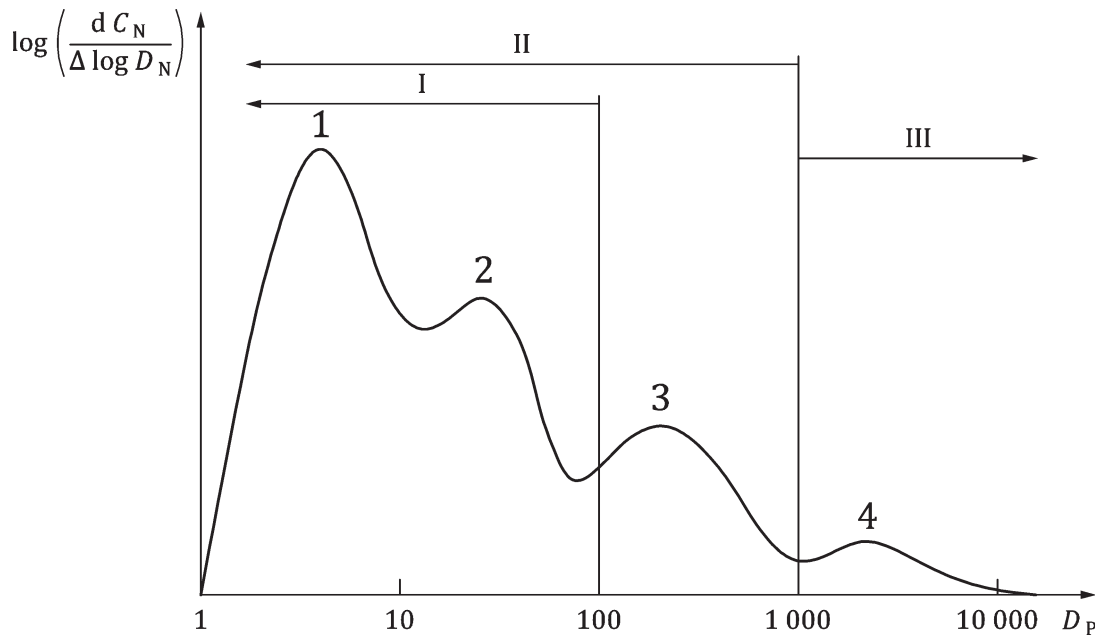
4 Symbole und Abkürzungen

CPC	Kondensationspartikelzähler (en: Condensation Particle Counter)
DMA	Differentieller Mobilitätsanalysator (en: Differential Mobility Analyser)
HEPA	en: High Efficiency Particulate Air
MPSS	Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (en: Mobility Particle Size Spectrometer)
PSL	Polystyrol-Latex
QA/QC	Qualitätssicherung/Qualitätskontrolle (en: Quality Assurance/Quality Control)

5 Atmosphärisches Aerosol

Die Zusammensetzung atmosphärischer Aerosole hängt wesentlich von ihren lokalen und regionalen Quellen ab. Insbesondere die Größenverteilung von Anzahl und Masse sowie die größen aufgelöste chemische Zusammensetzung sind stark schwankend. Aerosolpartikel werden entweder direkt emittiert (primäre Aerosole) oder durch Nukleation und Kondensation aus Vorläufergasen gebildet (sekundäre Aerosole). Bei Verbrennungsvorgängen entstehen sowohl primäre als auch sekundäre Aerosole [1].

Durch diese unterschiedlichen Entstehungsprozesse zeigt die Größenverteilung atmosphärischer Aerosole drei bis vier verschiedene Modi, die schematisch in Bild 1 skizziert sind.



Legende

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1 Nukleationsmodus | I Ultrafeine Partikel |
| 2 Aitken-Modus | II Feine Partikel |
| 3 Akkumulationsmodus | III Grobe Partikel |
| 4 Grobmodus | |

Bild 1 — Schematische Darstellung der verschiedenen Größenverteilungsmodi atmosphärischer Aerosole (Modushöhe nicht maßstabsgerecht)

Partikel im Nukleationsmodus werden hauptsächlich durch photochemische Reaktionen und durch Mischungsprozesse gasförmiger Vorläufer gebildet. Werden die Vorläufergase weiterhin zugeführt, wachsen sie schnell durch Kondensation und ihre Größe wird in den Aitken-Modus verschoben. Verbrennungsvorgänge erzeugen Partikel direkt im Aitken-Modus. Die Partikelgröße im Aitken-Modus steigt hauptsächlich durch Wolkenprozesse, Kondensation und Koagulation an und die Partikel gelangen dann in den Akkumulationsmodus. Partikel im Grobmodus werden hauptsächlich durch mechanische Prozesse erzeugt, beispielsweise durch Abrieb und Resuspension von Mineralstaub, Dispersion von Meersalz in Partikelform und Emission von Pollen und anderem biologischem Material. Sowohl die Akkumulations- als auch die Grobmodus-Partikel sind in der Anzahlverteilung oft nicht klar erkennbar, tragen jedoch wesentlich zur Massenverteilung bei.

Neben diesen Definitionen aus der Atmosphärenphysik gibt es auch gesundheitsbezogene und regulatorische Definitionen für feine, ultrafeine und grobe Partikel. Die Größenbereiche für diese Begriffe sind auch in Bild 1 angegeben.

Massebezogen sind bei der globalen direkten Emission von Aerosolpartikeln Meersalz, biologische Materialien sowie Wüsten- und Vulkanstaub vorherrschend. Diese Partikel sind im Allgemeinen größer als 1 µm (Grobmodus). Emissionen anthropogener Herkunft spielen in diesem Größenbereich eine untergeordnete Rolle. Natürliche Aerosole im Submikrometerbereich bestehen hauptsächlich aus marinem Sulfat, biogenen organischen Stoffen und kohlenstoffhaltigen Partikeln aus Flächenbränden. Anthropogene Aerosole im Submikrometerbereich sind komplexe Gemische aus primären und sekundären Partikeln, die hauptsächlich aus Sulfat, Nitrat, organischen Stoffen und elementarem Kohlenstoff bestehen.

Die Partikelanzahlkonzentrationen atmosphärischer Aerosole umfassen mehrere Größenordnungen. Während marine oder freie troposphärische Aerosole Anzahlkonzentrationen im Bereich von einigen Zehn oder Hundert je Kubikzentimeter aufweisen, können kontinentale oder urbane Aerosole einige Tausend bis zu einer Million Partikel je Kubikzentimeter enthalten. Bei der Anzahlkonzentration anthropogener Aerosole

über Land, vor allem in urbanen Gebieten, sind Partikel in einem Größenbereich unter $0,1\text{ }\mu\text{m}$ vorherrschend. Größere Quellen hoher Partikelanzahlkonzentrationen in diesem Größenbereich sind die regionale Partikelneubildung durch homogene Nukleation und lokale Verbrennungsvorgänge. Die mittleren Hintergrundkonzentrationen in urbanen Gebieten liegen bei mehreren Zehntausend Partikel je Kubikzentimeter.

Weitere Einzelheiten enthält Anhang H.

6 Beschreibung des Verfahrens

6.1 Probenahme und Konditionierung

6.1.1 Probenahme

Die Messung atmosphärischer Aerosole erfordert stets eine Probenahme und den Transport der Probe zum Messgerät. In manchen Fällen muss die Probe darüber hinaus in Bezug auf Temperatur, relative Feuchte und Partikelkonzentration konditioniert werden, um das Aerosol an die zulässigen Betriebsbedingungen des Messgeräts anzupassen.

Die Angaben hier beziehen sich auf stationäre Luftgütemessstellen. Für mobile Anwendungen (z. B. Messungen aus einem Flugzeug) sind weitere Aspekte zu berücksichtigen.

Die Messgeräte müssen in einer geschützten Umgebung unter kontrollierten Bedingungen (Temperatur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) betrieben werden.

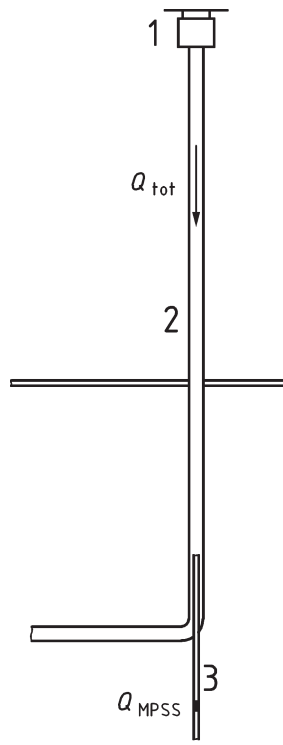
Der Probenahmeort ist durch die Messaufgabe bedingt. Für Messungen des ungestörten atmosphärischen Aerosols sollte der Lufteinlass 5 m bis 10 m über dem Boden liegen. Wegen Gebäuden, Vegetation oder Topographie des Geländes ist möglicherweise eine höhere Probenahmestelle erforderlich. Die Messung von Aerosolen, denen der Mensch direkt ausgesetzt ist (z. B. Verkehr), erfordert dagegen deutlich niedrigere Probenahmestellen ($1,5\text{ m}$ bis 4 m über dem Boden; siehe Richtlinie 2008/50/EG [2]).

Die Ausführung des Aerosoleinlasses sollte eine repräsentative Probenahme unabhängig von der Windrichtung über einen großen Bereich von Windgeschwindigkeiten ermöglichen. Dies ist jedoch für die kleinen Partikel, die mit einem MPSS gemessen werden, unkritisch. Es ist dafür zu sorgen, dass die Probenahmeleitungen nicht durch Partikel größer als $10\text{ }\mu\text{m}$ verunreinigt werden. Zu diesem Zweck kann ein PM10- oder PM2,5-Einlass verwendet werden (siehe Bild 2).

Die Probe wird dem Messgerät idealerweise über ein vertikales primäres Probenahmerohr ohne Krümmungen zugeführt. Da für Gasmessverfahren grundsätzlich andere Anforderungen an die Probenahme gelten, sollte die Probenahme für Gase und Aerosole unabhängig voneinander durchgeführt werden.

Um Partikelverluste durch Diffusion zu den Wänden zu vermeiden, muss das Aerosol über eine Pumpe mit einem primären Volumenstrom (Q_{tot}) entnommen werden, der deutlich höher als der sekundäre Volumenstrom (Q_{MPSS}) ist. Das Messgerät sollte seine Probe isoaxial im zentralen Bereich dieses Volumenstroms über ein sekundäres Probenahmerohr, das so kurz wie möglich ist, entnehmen. Die Strömung im primären Probenahmerohr sollte laminar sein, um zusätzliche Partikelverluste durch Turbulenz zu verhindern. Idealerweise ist eine Reynoldszahl von etwa $Re = 2\ 000$ anzustreben (siehe 8.2), um Verluste durch Diffusion möglichst gering zu halten.

Die Partikelverluste durch Diffusion in der Probenahmeeinrichtung müssen ermittelt und korrigiert werden (siehe Anhang C).



Legende

- 1 PM-Probeneinlass
- 2 Primäres Probenahmerohr
- 3 Sekundäres Probenahmerohr

Bild 2 — Grundsätzliche Ausführung der Aerosolansaugöffnung

Der Aerosoleinlass und die Probenahmeleitungen müssen aus einem leitfähigen, korrosionsbeständigen Material mit geringer Oberflächenrauheit (z. B. Edelstahl) bestehen und geerdet sein. Damit werden chemische Veränderungen des Aerosols und Partikelverluste durch elektrostatische Effekte verhindert. Für kleine Verbindungen oder kurze Entfernungen können auch flexible Schlauchleitungen aus einem elektrisch leitfähigen Material verwendet werden. Die Schlauchleitungen sollten insgesamt kürzer als 50 cm sein.

Der Einlass und der Strömungsteiler der Probenahmeeinrichtung sind regelmäßig auf Verstopfungen, z. B. durch Insekten, zu überprüfen und bei Bedarf zu reinigen.

6.1.2 Trocknung des Aerosols

Aerosole mit hoher relativer Feuchte (in extremen Fällen Nebel) sollten getrocknet werden, da die Größe hydrophiler Partikel (Partikel, die Salze oder wasserlösliche organische Stoffe enthalten) aufgrund des hygroskopischen Wachstums in hohem Maß von der relativen Feuchte abhängt. Die relative Feuchte der Luft steigt bei Abkühlung in einer klimatisierten Umgebung unter Umständen deutlich an. Als Anforderung gilt, dass die relative Feuchte des Probenstroms am MPSS-Einlass kleiner als 40 % sein muss [3]. Die relative Feuchte am MPSS-Einlass muss überwacht werden.

Bezüglich der Temperaturverhältnisse sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Ist die Raumtemperatur höher als 22 °C, wird kein Aerosol-Trockner benötigt, wenn die Taupunkttemperatur der Außenluft 10 °C nicht übersteigt.
- Liegt die Taupunkttemperatur zwischen 10 °C und der Raumtemperatur, ist der sekundäre Volumenstrom zu trocknen.

- Liegt die Taupunkttemperatur über der Raumtemperatur, ist der primäre Volumenstrom vor Eintritt in den Raum zu trocknen. Gegebenenfalls ist eine zusätzliche Trocknung des sekundären Volumenstroms erforderlich.

Für die Trocknung des Aerosols werden drei Verfahren empfohlen:

- silikagelbasierter Aerosol-Diffusionstrockner;
- Membrantrockner (z. B. NafionTM-Trockner);
- Verdünnung mit trockener partikelfreier Luft. Das Verdünnungsverhältnis muss genau bekannt sein, damit die richtigen Konzentrationen berechnet werden können. Die Mindestanforderung hinsichtlich der Genauigkeit des Verdünnungsfaktors wird in 8.2 angegeben, das Funktionsprinzip eines geeigneten Verdünnungssystems ist in Anhang G dargestellt.

Heizen wird nicht empfohlen, da hierdurch das Aerosol verändert werden kann (signifikante Verdampfung halbfüchtiger Verbindungen bei über 40 °C).

6.2 Ermittlung der Partikelanzahlgrößenverteilung mit einem MPSS

6.2.1 Physikalisches Prinzip

Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (MPSS) bestehen aus der sequenziellen Anordnung eines bipolaren Diffusionsaufladers, eines Differentiellen Mobilitätsanalysators (DMA) und eines Kondensationspartikelzählers (CPC). Durch die Einstellung unterschiedlicher Spannungen im DMA werden Partikel unterschiedlicher elektrischer Mobilität ausgewählt und deren Partikelanzahlkonzentration kann gemessen werden. Durch kontinuierliche oder stufenweise Änderung der Spannung erhält man eine Verteilung der elektrischen Partikelmobilität, die anschließend in eine Partikelanzahlgrößenverteilung umgerechnet werden kann (ISO 15900).

ANMERKUNG In ISO-Normen werden die Begriffe DMAS (Differential Mobility Analysing System) und DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) für MPSS bzw. DMA verwendet. Ein bipolarer Diffusionsauflader wird in ISO-Normen als „Charge conditioner“ bezeichnet.

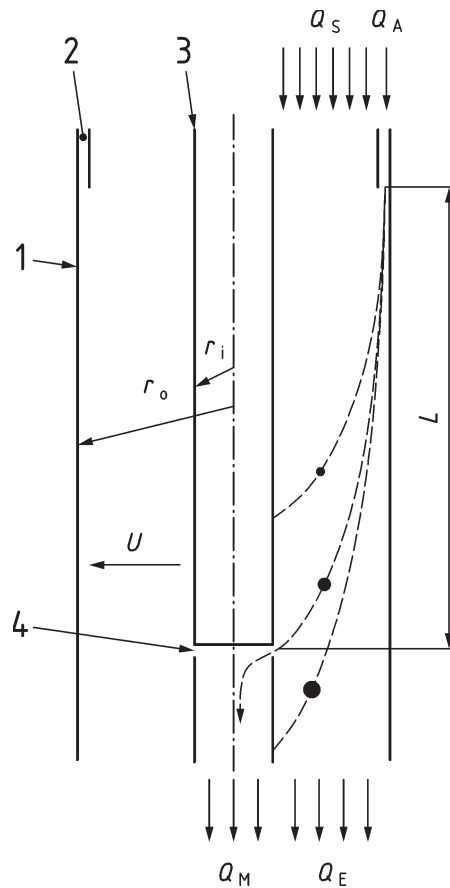
6.2.2 Partikelaufladung

Bevor die Aerosolpartikel in den DMA gelangen, werden sie mit einem bipolaren Diffusionsauflader in ein bipolares Ladungsgleichgewicht gebracht. Dieses bipolare Ladungsgleichgewicht kann theoretisch beschrieben werden [4] (Partikelaufladewahrscheinlichkeiten als Funktion der Partikelgröße und vereinfachte Berechnungsverfahren hierfür sind in Anhang A angegeben). In diesem bipolaren Diffusionsauflader werden kontinuierlich positive und negative Ionen erzeugt, zum Beispiel durch eine radioaktive Quelle oder eine weiche Röntgenquelle. Radioaktive Quellen, die in Felduntersuchungen eingesetzt werden, sind beispielsweise ⁸⁵Kr, ⁶³Ni (Beta-Emitter), ²⁴¹Am und ²¹⁰Po (Alpha-Emitter).

Um ein bipolares Ladungsgleichgewicht zu erhalten, sollte die Partikelanzahlkonzentration signifikant niedriger als die Ionenpaargleichgewichtskonzentration sein, die auf etwa 10^7 cm^{-3} geschätzt wird. Da mehr Ladungen an große als an kleine Partikel gebunden sind, ist der obere Konzentrationsgrenzwert abhängig von der Partikelanzahlgrößenverteilung des Aerosols, sodass kein allgemeingültiger Wert für die maximale Konzentration angegeben werden kann. Als Obergrenze für die dem MPSS zugeführten Partikelanzahlkonzentration wird 10^5 cm^{-3} empfohlen.

6.2.3 Mobilitätsanalyse

Ein DMA hat meist die Form eines zylindrischen Kondensators (siehe Bild 3). Das aufgeladene polydisperse Aerosol tritt mit einem Volumenstrom Q_A durch einen Ringspalt im Bereich der Außenelektrode in den DMA ein und wird dann mit dem partikelfreien Schleierluftstrom Q_S zusammengeführt.



Legende

- 1 Außenelektrode; Radius r_o
- 2 ringförmiger Einlassspalt
- 3 Innenelektrode; Radius r_i
- 4 ringförmiger Auslassspalt
- U Spannung

- Q_A Volumenstrom des polydispersen Aerosols
- Q_S Schleierluftvolumenstrom
- Q_M Volumenstrom des nach Mobilität selektierten Aerosols
- Q_E Volumenstrom der Überschussluft
- L effektive Länge

Bild 3 — Prinzip eines DMA

Alle Volumenströme müssen streng laminar sein. Aufgrund der Spannung zwischen Innen- und Außenelektrode bewegen sich die geladenen Partikel senkrecht zur Strömungsrichtung entweder zur Innenelektrode oder, bei umgekehrtem Ladungsvorzeichen, zur Außenelektrode. Das Verhältnis der Partikelgeschwindigkeit v_E zum elektrischen Feld E ist nach Gleichung (1) definiert als die elektrische Mobilität des Partikels:

$$Z_p = \frac{v_E}{E} = \frac{n \cdot e \cdot C(D_p)}{3\pi \cdot \eta \cdot D_p} \quad (1)$$

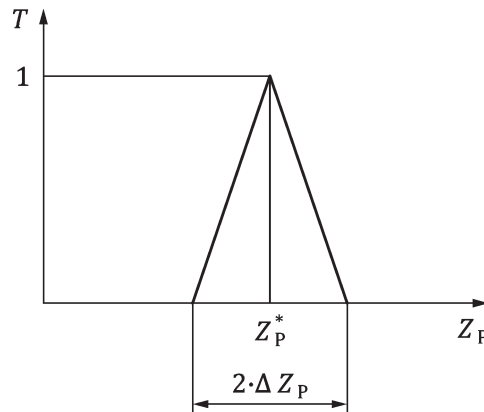
Dabei ist

- Z_p die elektrische Mobilität eines geladenen Partikels;
- n die Anzahl der Elementarladungen auf dem Partikel;
- e die Elementarladung ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C);
- $C(D_p)$ der Cunningham-Korrekturfaktor (siehe Anhang B);
- η die dynamische Gasviskosität;
- D_p der Partikeldurchmesser.

Die elektrische Mobilität der Partikel hängt hauptsächlich von der Anzahl der Elementarladungen auf dem Partikel (proportional) und dem Partikeldurchmesser (umgekehrt proportional) ab, aber auch von der dynamischen Gasviskosität, der Partikelform, dem Cunningham-Korrekturfaktor und somit indirekt auch von der Temperatur und vom Druck des durch den DMA strömenden Gases (ISO 15900). Je kleiner der Partikeldurchmesser und je größer die Anzahl der Ladungen, umso größer ist die elektrische Mobilität.

ANMERKUNG Die Cunningham-Korrektur wird oft auch einfach als Slip-Korrektur bezeichnet.

Da die Abmessungen des Ein- und Auslassspaltes sowie die Volumenströme des polydispersen und nach Mobilität selektierten Aerosols nicht unendlich klein sind, treten nicht nur Partikel mit einer bestimmten Mobilität in den Auslassspalt ein, sondern auch Partikel mit etwas größerer oder kleinerer Mobilität. Dieses Verhalten kann mit einer Übertragungsfunktion beschrieben werden, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Partikel einer bestimmten Mobilität bei einer bestimmten Spannung oder nominalen Mobilität in den Auslassspalt gelangt (siehe Bild 4). Im gewünschten Fall, dass $Q_S = Q_E$ und $Q_A = Q_M$, kann diese Übertragungsfunktion näherungsweise durch ein Dreieck mit einer Höhe von 1 dargestellt werden.



Legende

T	Übertragungsfunktion
Z_p	elektrische Mobilität
Z_p^*	mittlere elektrische Partikelmobilität
ΔZ_p	halbe Breite der Übertragungsfunktion

Bild 4 — DMA-Übertragungsfunktion

Bei Kenntnis der Abmessungen des DMA (Länge und Radien der Innen- und Außenelektrode) und der Volumenströme innerhalb des DMA kann die Spannung zwischen den Elektroden für die mittlere elektrische Partikelmobilität Z_p^* berechnet werden (siehe Gleichung (2)).

$$U = \frac{Q_S \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \cdot Z_p^* \cdot L} \quad (2)$$

Dabei ist

- U die Spannung;
- Q_S der Schleierluftvolumenstrom;
- r_o der Radius der Außenelektrode;
- r_i der Radius der Innenelektrode;
- Z_p^* die mittlere elektrische Partikelmobilität;
- L die Länge der Elektrode.

Die Breite des Dreiecks $2 \cdot \Delta Z_p$, das die Mobilitätsauflösung des DMA angibt, hängt nach Gleichung (3) vom Verhältnis der Volumenströme Q_A und Q_S ab.

$$2 \cdot \Delta Z_p = \frac{Q_A}{Q_S} \cdot Z_p^* \quad (3)$$

Dabei ist

- Z_p die elektrische Mobilität eines geladenen Partikels;
- Q_A der Volumenstrom des polydispersen Aerosols;
- Q_S der Schleierluftvolumenstrom;
- Z_p^* die mittlere elektrische Partikelmobilität;
- ΔZ_p die halbe Breite der Übertragungsfunktion.

Die Partikelanzahlkonzentration im Probenvolumenstrom wird mit einem CPC gemessen. Die Verteilung der elektrischen Partikelmobilität wird durch Messung der Partikelanzahlkonzentration bei verschiedenen Spannungen, die den gesamten Bereich der zu untersuchenden elektrischen Partikelmobilität abdecken, ermittelt.

Dies kann durch schrittweises Erhöhen oder Verringern der Spannung erfolgen, wobei nach jedem Schritt gewartet wird, bis eine stabile Anzahlkonzentration erreicht ist. Bei einer typischen Anzahl von 32 Mobilitätswerten führt dies zu einer Messdauer in der Größenordnung von 10 min. Für schnellere Messungen kann entweder die Spannung kontinuierlich über eine Zeitspanne von wenigen Minuten erhöht (Upscan) oder verringert werden (Downscan) oder beides (Scan-Verfahren). Dabei ist es wichtig, die Transportzeit (Verzögerungszeit) der Partikel in der Messanordnung zu kennen, um die Anzahlkonzentrationen zu den entsprechenden Spannungen in Bezug setzen zu können.

Die für die Abdeckung des gesamten Mobilitätsbereichs erforderlichen Spannungen reichen von wenigen Volt für Partikel mit einem Durchmesser von 10 nm bis zu 10 kV für Partikel mit Durchmessern von 800 nm. Eine Hochspannungsversorgung mit einer Ausgangsspannung im Bereich von 0 V bis 10 kV ist normalerweise am unteren Ende dieses Bereichs weniger genau. Das bedeutet, dass die Spannungen für die Messung von Partikeln im Bereich von 10 nm bis 20 nm um etwa 20 % gegenüber dem Nennwert schwanken können, wodurch sich vergleichbare Fehler bei der Bestimmung der Partikelgröße ergeben.

6.2.4 Dateninversion

Partikel gelangen mit positiven und negativen Ladungen in den DMA, viele der kleineren Partikel sind auch ungeladen. Partikel unterschiedlicher Größe können die gleiche elektrische Mobilität aufweisen, je nach der Anzahl der Elementarladungen auf dem jeweiligen Partikel. Die Ermittlung der Partikelanzahlgrößenverteilung erfordert daher eine Dateninversion, mit der die größenabhängigen Ladungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden [5].

Eine signifikante Anzahlkonzentration von Partikeln, deren Größe die Größengrenze des MPSS überschreitet, und die viele Elementarladungen tragen, führt bei diesem Prozess zu erheblichen Fehlern. In solchen Fällen ist ein Vorabscheider am DMA-Einlass einzusetzen. Bei den meisten Außenluftmessungen kann auf einen Vorabscheider verzichtet werden, wenn der Messbereich des MPSS bis 800 nm oder höher reicht. Grund dafür ist, dass die atmosphärische Partikelanzahlgrößenverteilung sehr steil zu größeren Partikeln hin abfällt und dadurch der Beitrag mehrfach geladener Partikel unbedeutend wird. Empfindlichkeitstests haben gezeigt, dass Mehrfachladungen bei Partikeln mit Durchmessern über 800 nm nur dann von Bedeutung sind, wenn diese großen Partikel in außergewöhnlich hoher Zahl vorliegen, zum Beispiel bei verkehrsbezogenen, semi-ariden oder küstennahen Messstellen. Diese außergewöhnlichen Umstände zeigen sich in der Regel durch das Fehlen des steilen Abfalls der Partikelanzahlkonzentration bei Größen unter 800 nm.

6.2.5 Korrektur für Partikelverluste durch Diffusion

Je kleiner die Partikelgröße ist, umso höher sind die Partikelverluste durch Diffusion. Diese Verluste hängen von der Geometrie der Strömungswege und den Volumenströmen ab. Bei einfachen Röhren mit rundem Querschnitt können die Partikelverluste durch Diffusion theoretisch berechnet werden (siehe Anhang B). Bei komplexeren Geometrien müssen diese Verluste experimentell ermittelt werden. Aus diesen Versuchsergebnissen kann eine äquivalente Länge der untersuchten Geometrie abgeleitet werden, die der Länge eines einfachen Rohrs mit den gleichen Verlusten entspricht. Ausgehend von dieser äquivalenten Länge können die Partikelverluste durch Diffusion dann wieder, abhängig von Partikelgrößen und Volumenströmen, berechnet werden.

Das sekundäre Probenahmerohr kann zusammen mit den Bauteilen eines MPSS (Trockner, Diffusionsauflader, DMA und Verbindungsleitungen) eine äquivalente Länge von fast 10 m erreichen. Das heißt, dass die Verluste für Partikel am unteren Ende des Größenbereichs ($D_p = 10 \text{ nm}$) bis zu 80 % betragen können. Im primären Probenahmerohr sind die Partikelverluste deutlich geringer, aber nicht vernachlässigbar.

Die gesamten Partikelverluste durch Diffusion im Messgerät und in den Proberohren sind auf der Grundlage einer äquivalenten Länge als Funktion der Partikelgröße zu ermitteln. Dann wird die Anzahlkonzentration in jeder Größenklasse durch die Penetration (siehe Anhang B) für diese Größe geteilt, um den korrigierten Wert der Anzahlkonzentration zu erhalten.

Kommerzielle Messgeräte besitzen eine Korrektursoftware für Partikelverluste durch Diffusion. Diese ist jedoch nicht immer transparent und sie korrigiert auch nicht die Partikelverluste durch Diffusion in der Probenahmeeinrichtung. Zur Vereinheitlichung der Messergebnisse wird deshalb empfohlen, ein gängiges, auf der äquivalenten Länge beruhendes Verfahren für die Korrektur der Partikelverluste durch Diffusion anzuwenden. Hierfür kann entweder die Software im kommerziellen Gerät deaktiviert und eine Korrektur für das gesamte System durchgeführt werden (siehe Anhang C) oder es können, wenn das kommerzielle Gerät dies zulässt, standortspezifische Parameter in die Gerätesoftware eingegeben werden, womit die Korrektur für das Gesamtsystem auf einer allgemeinen transparenten Grundlage berechnet wird.

6.2.6 Korrektur für die Nachweisempfindlichkeit des CPC

Der CPC für die Partikelzählung im Probenvolumenstrom am DMA-Auslass muss die Anforderungen nach CEN/TS 16976 erfüllen. Seine Nachweisempfindlichkeit ist nach CEN/TS 16976 zu ermitteln. Die Partikelanzahlkonzentration in jeder Größenklasse, für die die Nachweisempfindlichkeit kleiner als 1 ist, muss durch den entsprechenden Wert der Nachweisempfindlichkeit geteilt werden, um die korrigierte Anzahlkonzentration zu erhalten.

7 Leistungskriterien des MPSS und Prüfverfahren

7.1 Leistungskriterien und Aufbau des MPSS

Die Anforderungen an den Aufbau des MPSS sind in Tabelle 1 angegeben, die Anforderungen an die Leistungskriterien des MPSS in Tabelle 2.

Tabelle 1 — Kriterien für den Aufbau des MPSS

Bauteil/Parameter	Anforderung
Vorabscheider (optional)	Der Vorabscheider wird nur benötigt, wenn das zu messende Aerosol eine signifikante Anzahlkonzentration an Partikeln enthält, die größer als die Größengrenze des MPSS sind (siehe 6.2.4). Dies kann ein Impaktor oder ein Zyklon (mit scharfer Trenngrenze) sein; $D_{50} = 1 \mu\text{m}$ (aerodynamischer Durchmesser, entspricht einem Mobilitätsdurchmesser von etwa 800 nm für atmosphärische Aerosole). Der Vorabscheider kann ein Teil des MPSS oder der Probenahmeeinrichtung sein.
Bipolarer Diffusionsauflader	Radioaktiver Ionisator (z. B. Kr-85, Am-241, Po-210, Ni-63), wobei eine bipolare Ladungsverteilung nach ISO 15900 anzunehmen ist; bei Verwendung anderer Ionisatoren (z. B. Röntgen) ist eine Ladungsverteilung zu verwenden, die die Messergebnisse an die Größenverteilung von Messgeräten mit radioaktivem Ionisator anpasst
Klassierer (DMA)	Zylindrische Geometrie; Schleierluft und Überschussluft sind in einem geschlossenen Kreislauf mit HEPA-Filter und Trockner zu führen; Messung von Temperatur (T) und relativer Feuchte (RH) des Aerosols und des Schleierluftstroms; RH Schleierluft < 40 % am DMA-Austritt; der Absolutdruck (p) ist entweder im Schleierluftstrom oder am Aerosoleinlass zu messen
Hochspannungsversorgung	Empfehlung; Möglichkeit zur unabhängigen Messung der Ausgangsspannung
Prüfung der Verzögerungszeit	Möglichkeit zur Durchführung von Upscans und Downscans mit hoher Größenauflösung, zumindest für die Kalibrierung
Partikeldetektor	CPC; muss die Anforderungen in CEN/TS 16976 erfüllen
Theoretische idealisierte Größenauflösung des DMA	$\Delta Z_p/Z_p^* \leq 0,125$ oder $Q_S/Q_A \geq 4$
Größenauflösung der Datenentfaltung	≥ 16 geometrisch gleich verteilte Größenkanäle je Größendekade
Zeit für die Messung einer Partikelanzahlgrößenverteilung	2 min bis 10 min
Datenverfügbarkeit	ACTRIS Ebene 0, Ebene 1 und Ebene 2 (siehe Anhang G)