

DIN EN ISO 16911-1

Diese Norm ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 5.
ICS 13.040.40

**Emissionen aus stationären Quellen –
Manuelle und automatische Bestimmung der Geschwindigkeit und des
Volumenstroms in Abgaskanälen –
Teil 1: Manuelles Referenzverfahren (ISO 16911-1:2013);
Deutsche Fassung EN ISO 16911-1:2013**

Stationary source emissions –
Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts –
Part 1: Manual reference method (ISO 16911-1:2013);
German version EN ISO 16911-1:2013

Émissions de sources fixes –
Détermination manuelle et automatique de la vitesse et du débit-volume d'écoulement
dans les conduits –
Partie 1: Méthode de référence manuelle (ISO 16911-1:2013);
Version allemande EN ISO 16911-1:2013

Gesamtumfang 97 Seiten

Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 16911-1:2013) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ (Sekretariat: DIN, Deutschland) in Zusammenarbeit mit dem Unterkomitee SC 1 „Stationary source emissions“ des Technischen Komitees ISO/TC 146 „Air quality“ erarbeitet. An der Erstellung dieser Norm waren deutsche Experten des Fachbereichs IV „Umweltmesstechnik“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL – beteiligt.

Die in der EN ISO 16911-1 beschriebene Staudrucksonde vom Typ L wird national üblicherweise als „Prandtl'sches Staurohr“ bezeichnet (siehe auch Bild A.5).

Deutsche Fassung

Emissionen aus stationären Quellen —
Manuelle und automatische Bestimmung der Geschwindigkeit
und des Volumenstroms in Abgaskanälen —
Teil 1: Manuelles Referenzverfahren
(ISO 16911-1:2013)

Stationary source emissions —
Manual and automatic determination of velocity and
volume flow rate in ducts —
Part 1: Manual reference method
(ISO 16911-1:2013)

Émissions de sources fixes —
Détermination manuelle et automatique de la vitesse et
du débit-volume d'écoulement dans les conduits —
Partie 1: Méthode de référence manuelle
(ISO 16911-1:2013)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 23. Februar 2013 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, 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

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Abkürzungen	8
4.1 Symbole	8
4.2 Abkürzungen	11
5 Grundlagen	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Grundlagen der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt im Abgaskanal.....	12
5.3 Prinzip der Messung des Volumenstroms	13
6 Auswahl des Messverfahrens	15
6.1 Messaufgaben	15
6.2 Auswahl der Technik zum Bestimmen der punktuellen Strömungsgeschwindigkeit.....	16
6.3 Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung des Volumenstroms und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.....	17
7 Messausrüstung	17
7.1 Allgemeines	17
7.2 Messung der Abgaskanal-Fläche.....	17
8 Verfahrenskenngrößen und Anforderungen.....	18
9 Messdurchführung	19
9.1 Standortanalyse vor der Prüfung.....	19
9.2 Bestimmung des Messquerschnitts und der Anzahl der Messpunkte	19
9.3 Kontrollen vor der Messdurchführung	19
9.4 Qualitätssicherung	21
9.5 Messung der Strömungsgeschwindigkeit an Messpunkten innerhalb des Messquerschnitts	22
9.6 Qualitätskontrolle nach Durchführung der Messungen	22
10 Berechnung der Ergebnisse.....	22
10.1 Allgemeines	22
10.2 Messung der Geschwindigkeit	23
10.3 Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit	23
10.4 Korrektur der mittleren Geschwindigkeit für Wandeffekte	23
10.5 Berechnung des Volumenstrom aus der mittleren Geschwindigkeit	24
10.6 Umrechnung der Ergebnisse auf Normbedingungen	24
11 Bestimmung der Messunsicherheit der Ergebnisse	25
12 Bewertung des Verfahrens	26

Anhang A (normativ) Messung der Geschwindigkeit mit differenzdruckbasierten Techniken	27
Anhang B (normativ) Flügelrad-Anemometer	40
Anhang C (normativ) Bestimmung des Volumenstroms und der mittleren Geschwindigkeit mit dem Tracergasverfahren.....	46
Anhang D (normativ) Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit mit Hilfe des Laufzeit-Tracergasverfahrens	53
Anhang E (normativ) Berechnung des Abgas-Volumenstroms aus dem Energieverbrauch	61
Anhang F (informativ) Beispiel einer für Messungen der Geschwindigkeit und des Volumenstroms mit einer Staudrucksonde aufgestellten Unsicherheitsbilanz	69
Anhang G (informativ) Beschreibung von Validierungsstudien	81
Anhang H (informativ) Differenzdruckmessung	89
Anhang I (informativ) Anwendung der Messeinrichtungen für die Laufzeittechnik auf der Grundlage von moduliertem Laserlicht	92
Anhang J (informativ) Zusammenhang zwischen EN ISO 16911-1 und den grundlegenden Anforderungen von EU-Richtlinien	93
Literaturhinweise	94

Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 16911-1:2013) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird, in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee ISO/TC 146 „Air quality“ erarbeitet.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis September 2013, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis September 2013 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

EN ISO 16911 besteht unter dem allgemeinen Titel *Emissionen aus stationären Quellen — Manuelle und automatische Bestimmung der Geschwindigkeit und des Volumenstroms in Abgaskanälen* aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: *Manuelles Referenzverfahren*
- Teil 2: *Kontinuierliche Messverfahren*

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

Einleitung

EN ISO 16911-1 beschreibt ein Verfahren zur periodischen Bestimmung der Axialgeschwindigkeit und des Volumenstroms von Gasen in Abgaskanälen und –kaminen sowie zur Kalibrierung von fest im Kamin eingebauten Volumenstrommesseinrichtungen.

EN ISO 16911-1 stellt ein Verfahren zur Verfügung, das zum Bestimmen des Strömungsprofils sowie des mittleren Durchflusses und des Volumenstroms Punktmessungen der Strömungsgeschwindigkeit verwendet. Sie bietet außerdem alternative Verfahren an, die auf der Injektion von Tracergas beruhen und verwendet werden können, um auch eine Routinekalibrierung für Volumenstrommesseinrichtungen zur Verfügung zu stellen; außerdem wird ein Verfahren beschrieben, das auf der Berechnung von Prozessbedingungen basiert. EN ISO 16911-1 bietet eine Orientierungshilfe, wann diese alternativen Verfahren verwendet werden können.

1 Anwendungsbereich

EN ISO 16911-1 legt ein Verfahren zur periodischen Bestimmung der Axialgeschwindigkeit und des Volumenstroms von Gasen in Abgaskanälen und -kaminen fest. Sie gilt für die Anwendung in runden oder rechteckigen Abgaskanälen mit Messstrecken, die den Anforderungen von EN 15259 entsprechen. Die minimalen und maximalen Kanalabmessungen sind durch praktische Erwägungen in Bezug auf die in der EN ISO 16911-1 beschriebenen Messeinrichtungen bedingt.

EN ISO 16911-1 fordert, dass für sämtliche Durchflussmessungen eine metrologische Rückführbarkeit auf nationale oder internationale Primärnormale nachgewiesen werden kann.

Um als ein Standard-Referenzverfahren angewendet zu werden, ist der Anwender aufgefordert, nachzuweisen, dass die Kenngrößen des Verfahrens im Vergleich zu den in EN ISO 16911-1 definierten Kenngrößen gleichwertig oder besser sind, und dass die Gesamtunsicherheit des Verfahrens, angegeben mit einem Vertrauensniveau von 95 %, bestimmt und berichtet wird. Die Ergebnisse für jedes in EN ISO 16911-1 definierte Verfahren sind mit unterschiedlichen Messunsicherheiten verknüpft, die im Bereich von 1 % bis 10 % bei Strömungsgeschwindigkeiten von 20 m/s liegen.

Anstelle dieser Verfahren dürfen weitere Verfahren angewendet werden, vorausgesetzt der Anwender kann auf Grundlage der Grundsätze der Technischen Spezifikation CEN/TS 14793 [10] die Gleichwertigkeit dieser Verfahren nachweisen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 20988, *Air quality — Guidelines for estimating measurement uncertainty*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

EN 14789, *Emissionen aus stationären Quellen — Bestimmung der Volumenkonzentration von Sauerstoff (O₂) — Referenzverfahren — Paramagnetismus*

EN 14790, *Emissionen aus stationären Quellen — Bestimmung von Wasserdampf in Leitungen*

EN 15259:2007, *Luftbeschaffenheit — Messung von Emissionen aus stationären Quellen — Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1
Staudrucksonde
Messeinrichtung zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt, das nach dem Prinzip der Differenzdruckmessung funktioniert

Anmerkung 1 zum Begriff: Es können mehrere Konstruktionsweisen von Staudrucksonden verwendet werden; dazu zählen Standard-, L-Typ-, S-Typ-, 2D- und 3D- Staudrucksonden. In Anhang A sind mehrere der gegenwärtig in Europa verwendeten Konstruktionsweisen von Staudrucksonden beschrieben.

3.2
Messachse
Linie auf einem Messquerschnitt durch den Abgaskanal, entlang der Durchflussmessungen erfolgen, um das Strömungsgeschwindigkeitsprofil oder den mittleren Volumenstrom zu bestimmen

3.3

Messquerschnitt

zur Mittelachse des Abgaskanals senkrechte Fläche am Ort der Probenahme, auf der die Messung der Strömungsgeschwindigkeit oder des Volumenstroms erforderlich ist

3.4

Messpunkt

Probenahmepunkt

Position im Messquerschnitt an dem der Probenahmestrom extrahiert wird oder Messdaten direkt erfasst werden

3.5

Volumenstrom

axial durch einen Abgaskanal strömendes Gasvolumen

Anmerkung 1 zum Begriff: Falls nicht ausdrücklich angegeben, wird damit der mittlere Volumenstrom im Messquerschnitt bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Volumenstrom wird in Kubimeter durch Sekunde oder Kubikmeter durch Stunde angegeben.

3.6

punktueller Strömungsgeschwindigkeit

örtliche Gasgeschwindigkeit an einem Punkt im Abgaskanal

Anmerkung 1 zum Begriff: Sofern nicht anders festgelegt, kann der Term als die Axialgeschwindigkeit im Messpunkt angesehen werden

Anmerkung 2 zum Begriff: Die punktueller Strömungsgeschwindigkeit wird in Meter durch Sekunde angegeben.

3.7

mittlere Strömungsgeschwindigkeit

<1> Geschwindigkeit, die mit der Fläche der Messebene multipliziert, den Volumenstrom in diesem Abgaskanal ergibt

<2> Quotient aus Volumenstrom und Fläche der Messebene

3.8

Normbedingungen

Referenzwert bei einem Druck von 101,325 kPa und einer Temperatur von 273,15 K

3.9

Messunsicherheit

dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können

3.10

Unsicherheitsbilanz

Zusammenfassung aller Unsicherheitsquellen, um die Gesamtunsicherheit des Verfahrens bei einem bestimmten Wert zu berechnen

Anmerkung 1 zum Begriff: Für die EN ISO 16911-1 sind die Unsicherheitsquellen nach ISO 14956 [5] oder ISO/IEC Guide 98-3 angegeben.

3.11

Standardmessunsicherheit

Unsicherheit des Messergebnisses, angegeben als Standardabweichung

3.12

erweiterte Messunsicherheit

Kennwert, der einen Vertrauensbereich um das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen bestimmten Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden können

Anmerkung 1 zum Begriff: In EN ISO 16911-1 wird die erweiterte Messunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor $k = 2$ und einem Vertrauensniveau von 95 % berechnet.

3.13

Gesamtmessunsicherheit

dem Messergebnis zugeordnete erweiterte kombinierte Standardmessunsicherheit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Gesamtmessunsicherheit wird nach ISO/IEC Guide 98-3 berechnet.

3.14

Drallströmung

zyklonale Strömung

Tangentialkomponente des Strömungsvektors, die ein Maß für die nicht-axiale Strömung im Messquerschnitt darstellt

3.15

automatische Messeinrichtung

AMS

vor Ort fest eingebaute Messeinrichtung zur kontinuierlichen Geschwindigkeitsmessung

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe EN ISO 16911-2.

3.16

metrologische Rückführbarkeit

Eigenschaft eines Messergebnisses, welches durch eine ununterbrochen dokumentierte Kalibrierkette auf eine Referenz bezogen werden kann, wobei jede Kalibrierung zur Messunsicherheit beiträgt.

Anmerkung 1 zum Begriff: Elemente zum Nachweis der metrologische Rückführbarkeit sind eine ununterbrochene metrologische Rückführbarkeitskette eines internationalen oder nationalen Messstandards, eine dokumentierte Messunsicherheit, eine dokumentierte Messprozedur, akkreditierte technische Kompetenz, metrologische Rückführbarkeit auf SI-Einheiten und Kalibrierintervalle.

4 Symbole und Abkürzungen

4.1 Symbole

A	Fläche der Messebene	m^2
A_I	Innenfläche des Abgaskamins oder -kanals im Messquerschnitt	m^2
A_S	Querschnittsfläche des Kanals	ft^2
B	Nummer der Komponente B	
α_1, α_2	Winkel zwischen den Sensoröffnungen	$^\circ$
c	Konstante	
d	äußerer Sondendurchmesser	mm
d_S	Kanaldurchmesser	mm
$e_{(N)}$	Unterer Heizwert des Brennstoffs	MJ/kg
e_P	absoluter Messfehler	

F	Krafteinwirkung auf das Flügelrad	N
$F_1(i)$	Neigungsverhältnis am Traversepunkt i	1
$F_2(i)$	Geschwindigkeits-Kalibrierkoeffizient für 3D-Sonden am Traversepunkt i	1
f	Frequenz des Flügelrades (Drehzahl)	s ⁻¹
f_v	Geschwindigkeitsfaktor	
f_{WA}	Wandkorrekturfaktor	
i	i -ter Messpunkt	
K	Koeffizient des Pitotrohrs, der den Pitotkalibrierfaktor und konstante Werte entsprechend des Pitotrohrdesigns umfasst	
K_p	Umrechnungsfaktor, $85,49 \text{ ft/s}[(\text{lb/lb-mol})(\text{inHg})/(R)/(\text{inH}_2\text{O})]^{0,5}$	
$K(\rho_0, \eta_{\text{dyn}})$	Nichtlinearer Kalibrierfaktor in Abhängigkeit von der Dichte, ρ_0 , und der Viskosität, η_{dyn}	
k	Erweiterungsfaktor	
L	Länge der Messstrecke, d.h. die Kanallänge zwischen den beiden Messebenen	m
L_p	Sondenlänge	
M	Molmasse des feuchten Gases	kg/mol
M_B	Molmasse der Komponente B	kg/mol
M_d	Molmasse des trockenen Gases	lb-lb/mol
M_s	Molmasse des feuchten Gases	lb-lb/mol
n	Anzahl der Messpunkte	
P	Energieerzeugung	MW
p	Abgasdruck	kPa
$p_1 \dots p_5$	Drücke an den Punkten $P_1 \dots P_5$	
p_2	Staudruck	Pa
p_3	statischer Druck	Pa
$(p_1 - p_2)_i$	Differenzdruck für die Geschwindigkeit am Traversepunkt i	inH ₂ O
$(p_4 - p_5)_i$	Differenzdruck für den Neigungswinkel am Traversepunkt i	inH ₂ O
p_{atm}	atmosphärischer Druck	inHg
p_c	absoluter Druck im Kanal, im Messquerschnitt	Pa
p_{dyn}	dynamischer Druck am Flügelrad	Pa
p_g	statischer Druck	inH ₂ O
p_s	absoluter Druck im Kanal	inHg
p_{std}	Normdruck	29,92 inHg
$\overline{p_{\text{stat}}}$	mittlerer statischer Druck im Messquerschnitt	Pa
$q_{m,t}$	Tracer-Massenstrom	kg/s
q_v	Volumenstrom	m ³ /s

$q_{V,0d}$	Volumenstrom bezogen auf Normzustand von Temperatur und Druck, trocken	m ³ /s
$q_{V,0d,O_2}$	Volumenstrom bezogen auf Normzustand von Temperatur und Druck, trocken und aktueller Sauerstoffkonzentration	m ³ /s
$q_{V,0d,O_2ref}$	Volumenstrom bezogen auf Normzustand von Temperatur und Druck, trocken und Bezugssauerstoffkonzentration	m ³ /s
$q_{V,0,O_2}$	Abgasvolumenstrom bei aktuellem O ₂ -Gehalt und aktueller Feuchte im Normzustand	m ³ /s
$q_{V, sd}$	mittlerer Gasvolumenstrom im Normzustand, trocken	dscf/h
$q_{V, sw}$	mittlerer Gasvolumenstrom im Normzustand, feucht	wscf/h
$q_{V,w}$	Volumenstrom bei aktueller Temperatur und Druck, feucht	m ³ /s
R	Gaskonstante	8,314 J/(K mol)
r_{Sp}	Geometriefaktor des Flügelrades	
T	Abgastemperatur	K
T_c	Abgastemperatur im Messquerschnitt	K
$T_{s(avg)}$	mittlere absolute Abgastemperatur im Kanal	R
$T_{s(i)} ^\circ F$	Abgastemperatur am Traversepunkt i	°F
$T_{s(i)} R$	absolute Abgastemperatur am Traversepunkt i	R
T_{std}	Normtemperatur (entspricht 273,15 K)	528 R
t	Transitzeit des Tracerimpulses zwischen den beiden Messpunkten	s
$u(v)$	Messunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit	m/s
v_0	Startgeschwindigkeit	m/s
v_c	in Strömungsrichtung korrigierte Geschwindigkeit	m/s
v_i	lokale Geschwindigkeit am Messpunkt i	m/s
v_{mess}	gemessene Geschwindigkeit	m/s
v_t	Umfangsgeschwindigkeit, $v_t = \omega r_{Sp}$	
v_∞	axiale Anströmgeschwindigkeit	m/s
$\bar{v}$	mittlere Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_v$	mittlere axiale Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_c$	korrigierte mittlere Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_p$	Mittelwert der Geschwindigkeitsmessungen an den Messpunkten	m/s
w_{ash}	Masseanteil der Asche vom Festbrennstoff wie vorgefunden	
w_C	Kohlenstoffmasseanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
w_f	Brennstoffanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
w_H	Wasserstoffmassenanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
w_{H_2O}	Feuchtigkeitsmassenanteil im Festbrennstoff wie vorgefunden	

w_N	Stickstoffmassenanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
w_O	Sauerstoffmassenanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
w_S	Schwefelmassenanteil im Brennstoff wie vorgefunden	
α	Neigungswinkel des Flügels (vom Flügelrad)	
Δp	Differenzdruck	Pa
$\overline{\Delta p_i}$	mittlerer dynamischer Druck am Punkt i des Messquerschnitts	Pa
η	thermischer Wirkungsgrad	
η_{dyn}	dynamische Viskosität	Pa s
θ_{meas}	gemessener Winkel	°
ρ	Dichte des Gasstroms unter Umgebungsbedingungen der Temperatur und des Drucks, feucht	kg/m ³
$\sigma_{\Delta p_i}$	Standardabweichung von m Staudruckmessungen im Punkt i	
$\Phi_{(N)F}$	Prozesswärmeabgabe	MW
φ_B	Volumenanteil der Komponente B	Volumenanteil
$\varphi_{\text{CO}_2, w}$	CO ₂ -Konzentration im feuchten Abgas	% Volumenanteil
$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$	Feuchtegehalt bezogen auf feuchtes Abgas	% Volumenanteil
φ_{O_2}	Sauerstoffgehalt bezogen auf trockenes Abgas	% Volumenanteil
$\varphi_{\text{O}_2, d}$	Sauerstoffgehalt im Kanal während der Messung im trockenen Abgas	% Volumenanteil
$\varphi_{\text{O}_2, \text{ref}}$	Bezugssauerstoffgehalt	% Volumenanteil
$\varphi_{\text{O}_2, w}$	O ₂ -Konzentration im feuchten Abgas	% Volumenanteil
φ_{ws}	Wasserdampfgehalt in Volumenanteilen (Methode 4)	Volumenanteil
ω	Winkelgeschwindigkeit	s ⁻¹
ϖ	Kreisfrequenz (Winkelgeschwindigkeit)	s ⁻¹

4.2 Abkürzungen

AMS	kontinuierlich registrierende Messeinrichtung
NSE	spezifische Nutzenergie
SRM	Standardreferenzmessverfahren
QA	Qualitätssicherung
WAF	Wandeffektanpassungsfaktor

5 Grundlagen

5.1 Allgemeines

EN ISO 16911-1 stellt ein Verfahren zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit und des Volumenstroms in einem Abgaskanal zur Verfügung. Sie beschreibt ein Verfahren zum Bestimmen des Geschwindigkeitsprofils im Messquerschnitt und ein Verfahren zur Bestimmung des Gesamtvolumenstroms im Abgaskanal, das auf einem Raster von punktuellen Geschwindigkeitsmessungen beruht, die im Messquerschnitt durchgeführt werden. Außerdem werden alternative Verfahren zur Bestimmung des Volumenstroms beschrieben, die auf der Messung von Tracergasverdünnung, Tracergas-Laufzeit sowie auf der Berechnung aus Verbrennungsparametern beruhen.

Die Techniken zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit an einem Punkt erfordern ein kalibriertes Differenzdruckmessgerät (Staudrucksonde) oder ein Flügelrad-Anemometer. In Abschnitt 6 sind die Auswahlkriterien für die Verwendung unterschiedlicher Bauarten von Staudrucksonden und für das Flügelrad-Anemometer angegeben. Es liegt jedoch in der Verantwortung des Anwenders sicherzustellen, dass das für eine gegebene Anwendung ausgewählte Verfahren den in EN ISO 16911-1 definierten Verfahrenskenngrößen entspricht. Die Bestimmung des Volumenstroms in einem Abgaskanal erfolgt durch Messen der axialen Gasgeschwindigkeit im Kanal in einer Reihe von Punkten entlang von Messachsen durch den Kanal in einem einzelnen Messquerschnitt. Die Anzahl der erforderlichen Messachsen und Messpunkte hängt von der Form und Größe des Abgaskanals ab. Die Anzahl der Messpunkte beruht auf dem Prinzip gleich großer Flächensegmente, wie in EN 15259 definiert. Der Volumenstrom wird aus der mittleren Axialgeschwindigkeit und der Kanalfäche im Messquerschnitt berechnet. Falls erforderlich wird eine Korrektur vorgenommen, um Wandeffekte zu berücksichtigen (siehe 10.4).

Außerdem werden drei alternative Verfahren zum Bestimmen des Volumenstroms und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit beschrieben.

- in Anhang C wird ein Verfahren beschrieben, das auf Tracergasverdünnungs-Messungen beruht. Bei diesem Verfahren wird der Volumenstrom aus der Verdünnung einer bekannten Konzentration von injiziertem Tracergas bestimmt;
- in Anhang D wird ein Verfahren beschrieben, das auf einem Messverfahren der Tracergas-Laufzeit beruht. Der Volumenstrom wird anhand der Zeit bestimmt, die ein Impuls eines Tracergases benötigt, um die Strecke zwischen zwei Messstellen zu durchlaufen;
- in Anhang E wird ein Verfahren zur Bestimmung des Volumenstroms beschrieben, das einen Ansatz auf der Grundlage von Berechnungen verwendet, um den Volumenstrom aus den gemessenen Parametern eines Verbrennungsprozesses herzuleiten.

EN ISO 16911-1 stellt Qualitätskontrollen zur Verfügung, um die Bedingungen für genaue Messungen zu verifizieren.

Der Volumenstrom kann bei Betriebs- oder bei Normbedingungen (273,15 K und 101,325 kPa) sowohl als feuchter als auch als trockener Betriebsvolumenstrom angegeben werden.

5.2 Grundlagen der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt im Abgaskanal

Die axiale Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt im Abgaskanal wird durch Anwendung eines der beiden in EN ISO 16911-1 beschriebenen Verfahren bestimmt, basierend auf der Messung des Differenzdrucks mittels Staudrucksonden und durch Flügelrad-Anemometrie. In den Anhängen sind die Verfahren detailliert beschrieben; Anhang A beschreibt die Differenzdruck-Messverfahren, Anhang B das Flügelrad-Anemometer.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird als Axialgeschwindigkeit im Abgaskanal an jedem Punkt nach EN 15259 bestimmt.

Die differenzdruckbasierten Verfahren beruhen auf dem in ISO 3966 [3] definierten Prinzip der Staudrucksonde. Eine Sonde mit einer oder mehreren Druckentnahmestellen wird in die Strömung gebracht. Das Grundprinzip besteht darin, dass auf eine Druckentnahmestelle das strömende Gas einwirkt und eine oder mehrere weitere Druckentnahmestellen dem statischen Druck im Abgaskanal ausgesetzt sind. Die Sondenanordnung überträgt die resultierende Druckdifferenz zwischen diesen Stellen an ein externes Differenzdruckmessgerät.

Es sind unterschiedliche Ausführungen des Differenzdruckmessverfahrens verfügbar. Dazu zählen Standard-, L-förmige, S-förmige und mehrachsige Staudrucksonden (3D- und 2D- Staudrucksonden). Jede Ausführung hat ihre eigenen speziellen Vor- und Nachteile, die in EN ISO 16911-1 beschrieben werden. Die angewendeten Verfahren beruhen auf den in ISO 10780 [2] und ISO 3966 [3] festgelegten Verfahren sowie auf US EPA Method 2 [14]. Es werden Verfahrenskenngrößen und Qualitätssicherungs-Verfahren angewendet, um die in EN ISO 16911-1 festgelegten Messunsicherheiten zu erreichen.

Beim Einsatz von 2D-Staudrucksonden sollten QA/QC Maßnahmen nach der US EPA Methode 2G [16] ergriffen werden.

5.3 Prinzip der Messung des Volumenstroms

5.3.1 Allgemeines

Der Volumenstrom kann aus einer Reihe von Messungen der punktuellen Geschwindigkeit in einem Abgaskanal bestimmt werden, die über den Messquerschnitt durchgeführt werden, oder durch alternative Verfahren wie Tracergasverdünnung, Tracergas-Laufzeit oder mittels Berechnung aus Prozessbedingungen. Die Anhänge C, D und E enthalten Einzelheiten zu diesen alternativen Herangehensweisen.

5.3.2 Prinzip der Bestimmung des Volumenstroms aus punktuellen Geschwindigkeitsmessungen

Der Volumenstrom wird aus einer Anzahl von Punktmessungen der axialen Strömungsgeschwindigkeit über einen Messquerschnitt bestimmt. Zur Beschreibung der Ungleichmäßigkeiten im Strömungsprofil wird eine ausreichende Anzahl von Punktmessungen durchgeführt. Die Messpunkte über den Messquerschnitt werden so ausgewählt, dass sie für Bereiche gleicher Teilflächen repräsentativ sind. Die mittlere Geschwindigkeit des den Messquerschnitt durchströmenden Gases wird mit guter Näherung als gleichwertig mit dem Mittelwert der punktuellen Strömungsmessungen berechnet. Zum Bestimmen der Messpunkte für runde und rechteckige Abgaskanäle werden die Verfahren nach EN 15259 angewendet. Für runde Abgaskanäle wird das Tangentialverfahren nach EN 15259 angewendet, wie in EN ISO 16911-1 beschrieben.

Der Grund dafür, dass von den beiden, in EN 15259 zur Verfügung gestellten Modellen zur Bestimmung gleicher Teilflächen für runde Abgaskanäle das Tangentialverfahren bevorzugt wird, besteht darin, dass dieses Modell den mittleren Volumenstrom in jeder flächengleichen Teilfläche repräsentiert. Der Punkt in der Mitte des Abgaskanals beim allgemeinen Verfahren liefert keinen Größenwert des mittleren Volumenstroms im Zentralbereich, sondern den Höchstwert. Das kann zum Rekonstruieren des Strömungsprofils von Nutzen sein, ist aber für die Bestimmung des mittleren Volumenstroms im Abgaskanal nicht empfehlenswert.

Der Messquerschnitt wird so gewählt, dass er für den erforderlichen Volumenstrom im Abgaskanal repräsentativ ist und sich in einem Bereich befindet, in dem eine gleichmäßige und stabile Strömung zu erwarten ist. Wenn im Messquerschnitt aufgrund der Geometrie des Abgaskanals oder anderer Anströmbedingungen eine nicht axiale Strömung (Drallströmung oder zyklonale Strömung) erwartet wird, dann wird der Verwirbelungsgrad durch Messungen mittels S-förmigen, 3D- oder 2D-Staudrucksonden bestimmt, und wenn er signifikant ist, wie in EN ISO 16911-1 definiert, dann wird er durch die Anwendung zusätzlicher Messverfahren berücksichtigt oder es wird ein anderer Messquerschnitt gewählt.

Eine verbesserte Messgenauigkeit in den Ergebnissen wird erforderlichenfalls durch Berücksichtigung von Wandeffekten erreicht, wobei eine Verfahrensweise angewendet wird, die für runde Abgaskanäle auf US EPA Method 2H [17] und für rechteckige Abgaskanäle auf US EPA CTM-041 [13] beruht.

Der Volumenstrom q_V wird durch Multiplizieren der mittleren Geschwindigkeit mit der Fläche des Messquerschnitts bestimmt (d. h. der Innenfläche des Abgaskanals im Messquerschnitt).

$$q_V = \bar{v}_p A \quad (1)$$

Dabei ist

$\bar{v}_p$ der Mittelwert der punktuellen Geschwindigkeitsmessungen;

A die Fläche der Messebene.

ANMERKUNG Es ist außerdem möglich, einen Bereich von Volumenströmen zu bestimmen, berechnet aus den Punktmessungen in jeder gleichgroßen Teilfläche, multipliziert mit der Fläche, die durch jeden Messpunkt repräsentiert wird. Jede Messpunktfläche ist, per definitionem, gleich der Fläche des Messquerschnitts geteilt durch die Anzahl der Messpunkte. Der Volumenstrom berechnet sich zu:

$$q_V = \sum_{i=1}^N v_i \cdot \frac{A}{n} \quad (2)$$

Dabei ist

v_i die i-te Punktmessung;

A die Fläche der Messebene;

n die Anzahl der Messpunkte.

Dies entspricht Gleichung (1).

5.3.3 Bestimmung des Volumenstroms mit Tracergasverdünnungsmessungen

Zum Messen des Volumenstroms wird die Tracergas-Injektion verwendet, indem die Verdünnung des injizierten Tracergases (Tracergases) durch den Abgasstrom bestimmt wird. Ein bekannter, nachweisbarer Massenstrom von kalibriertem Tracergas wird in den Abgaskanal injiziert. Nachdem eine vollständige Vermischung des Tracergases mit dem Abgas erfolgt ist, wird die Konzentration dieses Tracergases an einer Stelle stromabwärts gemessen, die für den Messquerschnitt repräsentativ ist. Die Verdünnung des Tracergases durch das Abgas ermöglicht eine Messung des Volumenstroms, vorausgesetzt dass:

- das Tracergas sich vollständig mit dem Abgas vermischt hat;
- vor der Injektion kein Tracergas im Abgas vorhanden ist oder die Hintergrundkonzentration gemessen und exakt subtrahiert werden kann.

5.3.4 Bestimmung des Volumenstroms mit Tracergas-Laufzeit-Messungen

Eine geringe Menge des Tracergasmaterials wird schnell in den Abgasstrom injiziert, um einen kurzen Tracergas-Impuls zu erzeugen. Nachdem sich der Tracergas-Impuls über den Querschnitt der Strömung verteilt hat, wird dessen Laufzeit zwischen zwei Messpunkten auf einem geeigneten geraden Abschnitt im Abgaskanal gemessen. Der Volumenstrom wird berechnet, indem das Volumen des Abgaskanals zwischen den Messpunkten durch die Laufzeit geteilt wird. Der mit Hilfe dieses Verfahrens ermittelte Volumenstrom ist für einen Bereich des Abgaskanals repräsentativ, der durch die Probenahmepunkte der Impulsmessung definiert ist. Sie werden so ausgewählt, dass sie für den erforderlichen Messquerschnitt repräsentativ sind.

5.3.5 Bestimmung des Volumenstroms aus der Wärmeleistung der Anlage

Für die meisten Verbrennungsquellen kann der Volumenstrom aus dem stöchiometrischen Abgasvolumen berechnet werden, das aus der Brennstoffzusammensetzung und der Zufuhrate der Wärmeenergie bestimmt wird. Die anwendbaren Berechnungsverfahren sind in EN 12952-15 [7] beschrieben, die sowohl direkte als auch indirekte Verfahren enthält. Bei einem direkten Verfahren wird die Brennstoffzufuhr gemessen und die Wärmeleistung aus dem Wärmewert des Brennstoffs und der Brennstoffzufuhr berechnet. Die Anwendung

eines indirekten Verfahrens umfasst die Messung der erzeugten Energie und des Wärmewirkungsgrades der Anlage. Insbesondere bei der Wärmeerzeugung oder bei Blockheizkraftwerken mit einem hohen Netto-Wärmewirkungsgrad von üblicherweise 90 % ist die Unsicherheit des indirekten Verfahrens zur Berechnung der Wärmeleistung sehr gering.

Um später den tatsächlichen Abgas-Volumenstrom zu bestimmen, muss in vielen Fällen die Sauerstoffkonzentration im Messquerschnitt gemessen werden, um die überschüssige Luft zu berücksichtigen. Die Sauerstoffkonzentration wird nach EN 14789 bestimmt. Das Berechnungsverfahren kann jedoch auch Ergebnisse bei Sauerstoff-Referenzwerten liefern, ohne dass die Bestimmung der Sauerstoffzusammensetzung im Abgaskanal erforderlich ist. Der Berechnungsansatz bestimmt den Volumenstrom bezogen auf trockenes Abgas. Er kann auch für die Bestimmung des Stroms des nassen Abgases eingesetzt werden, jedoch erhöht sich in diesen Fällen die Unsicherheit.

6 Auswahl des Messverfahrens

6.1 Messaufgaben

EN ISO 16911-1 stellt Verfahren zur Verfügung, die für mehrere unterschiedliche Ziele angewendet werden können. Der Anwender dieses Verfahrens muss das Ziel der Messaufgabe kennen, bevor die Messungen, wie durch EN 15259 gefordert, durchgeführt werden, weil die Auswahl des anzuwendenden Verfahrens, von der Messaufgabe abhängig sein kann.

Zu den Messaufgaben zählen:

- a) Messung der Geschwindigkeit an einem Punkt im Abgaskanal; das kann als Teil eines anderen Messverfahrens erforderlich sein, zum Beispiel bei der isokinetischen Probenahme von Partikeln;
- b) Messung des Strömungsprofils über einen Querschnitt im Abgaskanal;
- c) Bestimmung von Drallströmung;
- d) Kalibrierung einer AMS zur Bestimmung des Volumenstromes; diese Kalibrierung kann durch Volumenstrom oder Geschwindigkeit erfolgen;
- e) periodische Bestimmung des Volumenstroms durch einen Messquerschnitt.

In Tabelle 1 sind die Verfahren skizziert, die zum Erfüllen der Messaufgaben a) bis e) angewendet werden können.

Tabelle 1 — Auswahl des Messverfahrens

Ziel der Messung	Geeignetes Verfahren zum Durchführen der Messung
Geschwindigkeitsmessung an einem Punkt	Punktmessung: — Differenzdruckmessgeräte — Flügelrad-Anemometer
Bestimmung von Drallströmung im Messquerschnitt	Differenzdruckmessgerät, mit dem die Strömungsrichtung bestimmt werden kann — S-förmige Staudrucksonde — 3D- oder 2D- Staudrucksonde
Periodische Messung der mittleren Geschwindigkeit im Abgaskanal	Netz von punktuellen Geschwindigkeitsmessungen Tracergasverdünnungsverfahren Tracergas-Laufzeit-Verfahren Berechnungsansatz auf der Grundlage des Energieverbrauchs
Kalibrierung von AMS für mittlere Geschwindigkeit oder Volumenstrom	Netz von punktuellen Geschwindigkeitsmessungen Tracergasverdünnungsverfahren Tracergas-Laufzeit-Verfahren

Die in EN ISO 16911-1 beschriebenen Verfahren für punktuelle Geschwindigkeitsmessungen können angewendet werden, um jede der oben genannten Aufgaben zu erfüllen, sofern die Verfahrenskenngrößen dieses Verfahrens erfüllt werden.

Die in EN ISO 16911-1 beschriebenen alternativen Verfahren können angewendet werden, um den Volumenstrom zu bestimmen und für die Kalibrierung von kontinuierlich registrierenden Volumenstrommesseinrichtungen (AMS), vorausgesetzt es werden die spezifischen Anforderungen erfüllt, unter denen sie angewendet werden können. Diese sind in 6.3 detailliert beschrieben.

Vor der Auswahl des Messverfahrens sollte das Ziel der Volumenstrommessung klar definiert sein. Insbesondere die erforderliche Grundlage der Messungen, Abgas- oder Referenzbedingungen auf feuchter oder trockener Basis sollten bekannt sein, da die Auswahl des Messverfahrens durch diese beeinflusst werden kann.

BEISPIEL Wenn zum Beispiel die Strömungsmessungen zum Kalibrieren einer AMS dienen, die die Strömung unter Betriebsbedingungen misst, dann sollte die Strömung unter diesen Bedingungen bestimmt werden, um zusätzliche Messunsicherheiten zu vermeiden, die beim Umrechnen zwischen unterschiedlichen Bedingungen entstehen. In ähnlicher Weise werden Strömungswerte dann vorzugsweise direkt unter trockenen Bedingungen bestimmt, wenn Massenemissionsraten unter Verwendung von Konzentrationsdaten zu berechnen sind, die auf trockener Basis ermittelt wurden. Da es nicht immer möglich ist, dies zu erreichen, bietet EN ISO 16911-1 Verfahren zum Umrechnen der Daten auf unterschiedliche Bezugsbedingungen.

6.2 Auswahl der Technik zum Bestimmen der punktuellen Strömungsgeschwindigkeit

Um die Aufgaben 6.1 a) bis c) zu erfüllen, muss eine Technik angewendet werden, mit der die punktuelle Geschwindigkeit bestimmt werden kann. Diese Techniken können auch eingesetzt werden, um alle anderen Messaufgaben zu erfüllen. EN ISO 16911-1 gestattet die Verwendung von Differenzdruckmessgeräten oder Flügelrad-Anemometern, um die punktuelle Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Im Folgenden werden einige allgemeine Ratschläge zur Auswahl der Punkt-Messverfahren gegeben. Das Urteil von Sachverständigen und spezielle Bedingungen werden jedoch die Auswahl der Technik im Einzelfall beeinflussen.

Es gibt mehrere unterschiedliche Bauarten von Staudrucksonden, die für dieses Verfahren verwendet werden können. Anhang A beschreibt die Anwendung dieser Techniken. Dazu zählen L-förmige, S-förmige sowie 2D- und 3D-Staudrucksonden. Es dürfen unterschiedliche Bauarten von Staudrucksonden verwendet werden, vorausgesetzt sie genügen unter Einsatzbedingungen den in EN ISO 16911-1 festgelegten Verfahrenskenngrößen. Für bestimmte Abgaskanal- und Messbedingungen sind jedoch bestimmte Bauarten von Staudrucksonden eher geeignet.

Das Flügelrad-Anemometer darf unter der Voraussetzung angewendet werden, dass die in EN ISO 16911-1 festgelegten Verfahrenskenngrößen eingehalten werden. Anhang B bietet ein Verfahren zur Anwendung dieser Technik.

Die Aufgabe besteht darin, die Axialgeschwindigkeit an einem oder mehreren Punkten im Abgaskanal zu bestimmen. Die meisten Punktmessgeräte messen, wenn sie auf die Achse des Abgaskanals ausgerichtet werden, den Betrag des Strömungsgeschwindigkeitsvektors, wenn der Winkel der Strömung zur Achse klein ist (bei Laborvalidierungsstudien wurden typischerweise weniger als 20° beobachtet). Das bedeutet, dass diese Messeinrichtungen, die die Axialgeschwindigkeit um einen Faktor überschätzen könnten, der dem reziproken Kosinus des Winkels der Strömungsgeschwindigkeit zur Achse entspricht.

ANMERKUNG 1 Wenn die Strömung im Abgaskanal eine signifikante Drallströmung aufweist, ist es angebracht, die 3D-Staudrucksonde zu verwenden. 9.3.5 bietet ein Verfahren zur Bestimmung der Drallströmung sowie Kriterien, um zu bestimmen, ob die Drallströmung signifikant ist.

ANMERKUNG 2 In ISO 10780 [4] und EN 13284 [8] wird gesagt, dass die Staudrucksonde vom Typ S in Bezug auf die Ausrichtung zum Strömungsvektor empfindlicher sei als die Sonde vom Typ L. Bei der für EN ISO 16911-1 durchgeführten Laborprüfung konnte dies jedoch nicht beobachtet werden. Sowohl bei der Staudrucksonde vom Typ L als auch bei derjenigen vom Typ S konnte bei einer fehlerhaften Ausrichtung gegenüber dem Strömungsvektor eine ähnliche Reaktion beobachtet werden. In beiden Fällen konnte die fehlerhafte Ausrichtung der Staudrucksonden 15° bis 20° betragen, ohne das eine signifikante Änderung (< 1 %) bei der Ablesung der Geschwindigkeit auftrat.

Bei kleinen Zugangsöffnungen und bei der gemeinsamen Verwendung mit Probenahmesonden ist der Einsatz der Staudrucksonde vom Typ S geeigneter. Die Staudrucksonde vom Typ S kann auch für den Einsatz in Fällen geeigneter sein, in denen im Abgaskanal Tröpfchen oder eine signifikante Staubbelastung auftreten. Unter Bedingungen mit hoher Staubbelastung ist die Verwendung eines Flügelrad-Anemometers nicht empfehlenswert, da es verunreinigt werden kann, wodurch die Kalibrierung beeinträchtigt wird.

Bei Geschwindigkeiten von weniger als 5 m/s oder Differenzdrücken von weniger als 5 Pa ist das Flügelrad-Anemometer geeignet, geringere Messunsicherheiten zu liefern als das differenzdruckbasierte Verfahren.

6.3 Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung des Volumenstroms und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

Die mittlere Geschwindigkeit kann aus dem Mittelwert eines Rasters von punktuellen Strömungsmessungen bestimmt werden. In derartigen Fällen muss der Messquerschnitt den Anforderungen von EN 15259 entsprechen. Die Anhänge C, D und E zu EN ISO 16911-1 bieten Verfahren zur Messung des Volumenstroms und der mittleren Geschwindigkeit im Abgaskanal. Diese Verfahren sind das Tracergasverfahren mittels Verdünnung, das Tracergasverfahren mittels Laufzeitmessung sowie die Berechnung anhand der Prozessbedingungen für Verbrennungsprozesse.

Die Tracergasgasverfahren können zur Bestimmung des Volumenstroms und der mittleren Geschwindigkeit angewendet werden sowie für die Kalibrierung von AMS, die zum Bestimmen dieser Parameter verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Die Anwendung der Laufzeit von radioaktivem Tracergas kann durch nationale Vorschriften zur Verwendung von radioaktiven Tracergas eingeschränkt sein. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass ein gerader Abschnitt im Abgaskanal vorhanden sein muss, der lang genug ist, um entsprechende Laufzeitmessungen zu ermöglichen.

Da bei Tracergasverfahren eine vollständige Mischung des injizierten Materials notwendig ist, erfordern diese Verfahren den Einbau einer Injektionsöffnung an einer geeigneten Stelle und möglicherweise eine Öffnung für das Sensorelement.

Der Berechnungsansatz ist für die Bestimmung des Volumenstroms aus Verbrennungs- oder anderen Prozessen geeignet, bei denen die erforderlichen Prozessinformationen verfügbar sind, wie in Anhang E definiert. Die Verfahren dürfen nicht zur parallelen Kalibrierung von automatischen Einrichtungen zur Messung der Strömung angewendet werden. Bei diesen Verfahren wird der Durchfluss auf der Grundlage von Messungen oder zugeordneten Werten für Eingangsparameter des Verbrennungsprozesses beispielsweise Zusammensetzung und Menge des Brennstoffs bestimmt. Wo Eingangsdaten gemessen werden, müssen die verwendeten Messeinrichtungen einer angemessenen Qualitätskontrolle unterliegen und kalibriert sein. Für Brennstoffe mit variablem Wassergehalt muss eine Brennstoffprobe je Messreihe genommen und analysiert werden.

ANMERKUNG 2 Die Brennstoffzusammensetzung hat nur einen geringen Einfluss auf den Volumenstrom (trocken).

Verfahren zur Bestimmung des Volumenstroms können auch angewendet werden, um die mittlere Geschwindigkeit im Messquerschnitt zu ermitteln. Dies erfolgt durch Messung des Abgaskanal-Durchmessers und die Anwendung von Gleichung (1) und umgekehrt.

7 Messausrüstung

7.1 Allgemeines

Durchflussmessungen können, wie in Abschnitt 6 beschrieben, zur Erfüllung etlicher Aufgaben durchgeführt werden. Die eingesetzten Messmittel sind von der angewandten Technik abhängig und detailliert im entsprechenden normativen Anhang beschrieben.

7.2 Messung der Abgaskanal-Fläche

Messungen der Innenfläche des Abgaskanals sind als direkte Maßbestimmungen durchzuführen. Die Anwendung von technischen Zeichnungen oder Spezifikationen ohne Verifizierung auf der Grundlage von Messungen ist nicht gestattet. Vorsicht ist geboten, wenn zum Definieren des Innenmaßes Außenmessungen

erfolgen, z. B. die Verwendung des Außenumfangs bei runden Abgaskanälen oder die Messung der Seitenlängen bei einem rechteckigen Abgaskanal. Diese Herangehensweisen sollten nur dann gewählt werden, wenn die Wand des Abgaskanals eine konstante Dicke aufweist, gut definiert und einschalig ist. Außerdem müssen an jeder Messöffnung die Tiefe jeglicher Öffnungen und die Tiefe der Wand des Abgaskanals gemessen werden. Sofern er nicht signifikant abweicht, darf der Mittelwert dieser Werte angesetzt werden. Für die direkte Bestimmung des Innendurchmessers auf mindestens zwei Mittelachsen darf ein Laser-Messgerät (siehe Anhang I) oder eine geeignete starre Messstange angewendet werden. Es ist sicherzustellen, dass die Messungen senkrecht zur Mittelachse des Abgaskamins erfolgen und dass Einbauten und -öffnungen die Messung nicht beeinflussen. Bei Hochtemperaturkaminen sind im Falle der Anwendung eines Messstabes Auswirkungen durch die Temperatur zu berücksichtigen.

Die Verfahrenskenngrößen sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 — Verfahrenskenngrößen

Parameter	Kriterium	Bestimmungsverfahren
Innenfläche des Abgaskanals im Messquerschnitt	$\leq 2 \%$ des Wertes	Leistungsbewertung des Messverfahrens – Hinweis: Die Temperatur kann einen signifikanten Einfluss haben.

8 Verfahrenskenngrößen und Anforderungen

EN ISO 16911-1 definiert Verfahrenskenngrößen an die manuelle Bestimmung der punktuellen Geschwindigkeit über einen Messquerschnitt in einem Abgaskanal. Es dürfen andere Techniken angewendet werden; in diesem Fall muss nachgewiesen werden, dass sie die in EN ISO 16911-1 festgelegten Verfahrenskenngrößen erfüllen.

Die in Tabelle 3 definierten Verfahrenskenngrößen müssen von den Messverfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erfüllt werden.

Tabelle 3 — Verfahrenskenngrößen

Parameter	Kriterium	Bestimmungsverfahren
Standardabweichung der Wiederholpräzision der Messung im Labor	$< 1 \%$ des Wertes	Ermittlung im Windkanal bei Werten, die den gemessenen Bereich umfassen
Fehlende Anpassung (Linearität)	$< 2 \%$ des Wertes	Maximale Abweichung von der linearen Anpassung auf fünf Geschwindigkeitsniveaus im Windkanal
Unsicherheit aufgrund der Kalibrierung	$< 2 \%$ des vollen Skalenendwerts	Anhand des Kalibrierzertifikats für die Messeinrichtung
Kleinster messbarer Volumenstrom (Bestimmungsgrenze)	Kein Kriterium, er sollte jedoch bestimmt werden.	Dieser Parameter muss bestimmt werden, stellt jedoch keine Verfahrenskenngröße dar. Der Sensor darf nicht zum Messen von Volumenströmen unterhalb seiner Nachweisgrenze verwendet werden.
Empfindlichkeit gegenüber der Umgebungstemperatur ANMERKUNG: Nur außenliegende Teile der Messeinrichtung werden durch Umgebungsbedingungen beeinflusst.	$\leq 2 \%$ des Bereichs je 10 K	Leistungsbewertung der Messeinrichtung
Empfindlichkeit gegenüber dem Umgebungsdruck	$\leq 2 \%$ des Bereichs je 2 kPa	Leistungsbewertung der Messeinrichtung
Einfluss des Winkels des Sensors zur Strömung	$\leq 3 \%$ bei 15°	Leistungsbewertung der Messeinrichtung

9 Messdurchführung

9.1 Standortanalyse vor der Prüfung

Die Messstrecke muss nach EN 15259 eingerichtet sein. Eine Begehung der Anlage und des Messplatzes vor der Messung ist notwendig, um den Zugang zum Probenahmeort, die Anzahl und Maße der Messöffnungen, die Bedingungen am Arbeitsplatz, den Wetterschutz, Hindernisse sowie die Energieversorgung am Probenahmeort festzustellen. Anhand der gesammelten Informationen ist die geeignete Probenahme-einrichtung auszuwählen und ein Zeitplan für das Prüfverfahren festzulegen. Der Zeitplan der Messung sollte Daten, Anfangszeiten und die Dauer der Prüfperioden enthalten. Es ist sicherzustellen, dass die Betriebsbedingungen der Anlage während der Prüfperioden/Volumenstrom-Messung mit dem Wartepersonal und dem Betriebsverantwortlichen abgesprochen werden sollten.

Die Messung sollten unter Bedingungen, die möglichst nah an stationären Betriebsbedingungen liegen, durchgeführt werden. Um repräsentative Betriebsbedingungen zu erreichen, ist der Messablauf mit dem Betriebsverantwortlichen zu besprechen. Wenn Periodizität in der Strömung erwartet wird (Scheitel-wertschwankung > 10 % der mittleren Strömungsbedingungen), sollte der Messplan so gestaltet werden, dass für diese Schwankungen der Durchschnitt ermittelt wird.

Die Fläche der Volumenstrommesseinrichtung (Messfühler und Sonde) darf nicht mehr als 5 % der Probenahmefläche im Kamin überdecken.

ANMERKUNG Die vollständige Durchführung einer typischen Punktmessung in einem Abgaskanal, die beispielsweise 20 Messstellen erfordert, könnte bis zu 1 h dauern. Es ist wünschenswert, dass während dieser Zeit stabile Strömungs-verhältnisse herrschen.

9.2 Bestimmung des Messquerschnitts und der Anzahl der Messpunkte

Die Anforderungen in diesem Unterabschnitt gelten, wenn eine Reihe von Messungen über den Mess-querschnitt durchgeführt wird, um den Volumenstrom zu bestimmen.

Der Messquerschnitt zur Bestimmung des Volumenstroms muss den Anforderungen von EN 15259 entsprechen. Jede Abweichung von EN ISO 16911-1 muss aufgezeichnet werden.

Falls die Messungen durchgeführt werden, um die Strömungsbedingungen im Messquerschnitt zu charakterisieren, so muss berücksichtigt werden, dass die Strömung unter verschiedenen Prozessbedingungen (Last-bedingungen) zu bestimmen ist, da diese zu unterschiedlichen Strömungsbedingungen führen. Das gilt vor allem dann, wenn die Messungen erfolgen, um den Probenahmeort für den Einbau einer kontinuierlich registrierenden Volumenstrommesseinrichtung (AMS) oder deren Kalibrierung zu charakterisieren.

9.3 Kontrollen vor der Messdurchführung

9.3.1 Allgemeines

In Abhängigkeit vom Messplan sind vor dem Beginn der Probenahme die in EN 15259 geforderten vorbereitenden Inspektionen durchzuführen.

Beim Einsatz elektronischer Druckmesseinrichtungen muss eine Überprüfung der Kalibrierung durch Vergleich des Differenzdrucks mit Messungen mit einem Flüssigkeitsmanometer oder einem kalibrierten Drucksensor erfolgen, die eine geringere Messunsicherheit als die eingesetzte Druckmesseinrichtung aufweisen. Die Ergebnisse müssen innerhalb des Messunsicherheitsbereich der eingesetzten elektronischen Druckmesseinrichtung liegen, anderenfalls muss die Ursache gesucht und beseitigt werden. Die Auflösung der Druckmesseinrichtung muss mindestens 2 dezimale Stellen je Pascal betragen.

Der Innendurchmesser des Abgaskanals und dessen Wanddicke im Messquerschnitt sind für jede Messachse zu messen. Die Wanddicke des Abgaskanals sollte die Tiefe der Messöffnung umfassen. Die Verwendung von technischen Zeichnungen zur Bestimmung des Innendurchmessers des Abgaskanals ist möglich. Die Daten sollten jedoch plausibel sein. Die Anzahl der erforderlichen Messachsen und Messpunkte ist

entsprechend dem in EN 15259:2007, Anhang D, angegebenen Verfahren zu bestimmen, das auf dem Ansatz gleicher Teilflächen beruht. Bei runden Abgaskanälen ist der Tangentialansatz anzuwenden.

Die Position der einzuführenden Sonde sollte für jeden Punkt berechnet und die Sonde entsprechend markiert werden, wobei die Wand des Abgaskanals und die Tiefe der Messöffnung zu berücksichtigen sind.

Es ist eine geeignete Stelle zur Fixpunkt-Bestimmung der Strömung zu bestimmen, um die zeitliche Veränderung der Strömungsbedingungen zu ermitteln. Das kann ein zweites Strömungsmesseinrichtung sein oder eine geeignete kontinuierlich registrierende Volumenstrommesseinrichtung (AMS), vorausgesetzt es befindet sich an einer geeigneten Position.

Die Staudrucksonden sind vor und nach der Verwendung auf Folgendes zu kontrollieren:

- Deformationen, Grate oder Beschädigung der Staudrucksonde;
- Verstopfung der Druckentnahmestellen;
- Kurzschluss zwischen der Entnahmestelle für den Gesamtdruck und dem Referenzdruck (statischer Druck bei L-Pitot)
- Sauberkeit;
- Geradheit des Stützrohrs.

Die Flügelrad-Anemometer sollten vor und nach der Verwendung auf Folgendes kontrolliert werden:

- Beschädigung des Flügelrads und Gehäuses;
- Bildung von Ablagerungen auf den Flügelblättern;
- Sauberkeit;
- jegliche Verzögerung des Flügelrads bei leichtem Anblasen.

Jegliche oben genannten Probleme machen die Kalibrierung ungültig.

9.3.2 Vorprüfung auf Dichtheit

Bei Staudrucksonden sollte vor dem Durchführen der Messserie oder stets nach Beendigung einer Messreihe, je nach dem was häufiger auftritt, eine Kontrolle auf Dichtheit erfolgen. Das kann dadurch erreicht werden, dass das Rohr mit einem Druck beaufschlagt wird, der mindestens so hoch ist wie der statische Druck im Abgaskanal, während gleichzeitig die Druckmessbohrungen abgedichtet werden. Die Druckanzeige sollte über eine Dauer von 5 min keinen Druckabfall anzeigen.

9.3.3 Kontrolle der Druckentnahmestellen (Typ S Pitot) für Stau- und Referenzdruck

Staudrucksonden vom Typ S sind senkrecht zur Strömungsrichtung zu positionieren. Der statische Druck wird dann unter Verwendung beider Messöffnungen bestimmt. Die Differenz der gemessenen statischen Drücke muss weniger als 10 Pa betragen

9.3.4 Prüfungen der Wiederholpräzision an einem einzelnen Punkt

Wenn zwei Messeinrichtungen verwendet werden, eine ortsfeste und eine verschiebbare Einrichtung, so ist eine gleichgroße Teilfläche auszuwählen und es sind mindestens fünf Doppelablesungen der Geschwindigkeit unter Verwendung beider Messeinrichtungen in derselben Teilfläche durchzuführen. Aus der Standardabweichung der Differenzen zwischen diesen Ablesungen ist die Feldwiederholpräzision zu berechnen und mit dem Kriterium für die Feldwiederholpräzision, als Prozentangabe der Geschwindigkeit, aus Tabelle 4 zu vergleichen.

Wird nur eine Messeinrichtung verwendet, so ist die Wiederholpräzision aus der Standardabweichung von fünf aufeinander folgenden einminütigen Ablesungen der Strömungsgeschwindigkeit oder des Differenzdrucks zu berechnen.

ANMERKUNG Die Prüfung zur Wiederholpräzision bei Verwendung von nur einer Strömungsmesseinrichtung, wird sowohl den Einfluss von Änderungen in der Abgaskanal-Strömung als auch die Wiederholpräzision der Strömungsmesseinrichtung beinhalten. Das ist beabsichtigt, da nur bei stabilen Strömungsbedingungen die Verwendung einer einzigen Messeinrichtung vorgesehen ist.

9.3.5 Drallströmung/Zyklonale Strömung

Falls das Vorhandensein von Drallströmung entweder aus vorherigen Messungen bereits bekannt ist oder aufgrund der Geometrie oder Bedingungen im Abgaskanal erwartet wird, dann ist die nichtaxiale Strömung (die Wirbel innerhalb des Abgaskanals anzeigt) an jedem Messpunkt unter Verwendung von Differenzdruckmessgeräten nach den in ISO 10780 [4] festgelegten Verfahren zu beurteilen. Wenn an irgendeinem Messpunkt im Querschnitt einer der tangentialen Strömungswinkel mehr als 15° zur axialen Richtung beträgt, dann ist davon auszugehen, dass die Drallströmung einen signifikanten Einfluss auf die Messungen hat. In solchen Fällen sollte die Messung der Geschwindigkeit an jedem Punkt mit Messeinrichtungen erfolgen, die an jedem Punkt die Strömungsgeschwindigkeit und den Winkel der Strömung messen können. Dazu zählen 3D- und 2D-Staudrucksonden sowie Staudrucksonden vom Typ S.

Wenn die Drallströmung > 15° beträgt ist die geschwindigkeitskorrigierte Strömungsrichtung, v_c gegeben als:

$$v_c = \cos \theta_{\text{meas}} v_{\text{meas}}$$

Dabei ist

$\cos \theta_{\text{meas}}$ der Cosinus des gemessenen Winkels;

v_{meas} die gemessene Geschwindigkeit.

ANMERKUNG 1 Dies korrigiert die Strömungsrichtung und nicht den Wert der abgelesenen Geschwindigkeit.

ANMERKUNG 2 Die US EPA Methode 2 [14] beschreibt eine Prozedur zur Bestimmung der Drallströmung.

9.4 Qualitätssicherung

Um sicherzustellen, dass bei Messungen mit Differenzdruckmessgeräten die geringste Messunsicherheit erreicht wird, sind etliche Qualitätskontroll- und Qualitätssicherungsverfahren erforderlich. Diese sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4 — Verfahrenskenngrößen bei Feldmessungen

Parameter	Kriterium	Bestimmungsverfahren
Feldwiederholpräzision	≤ 5 % der Geschwindigkeit	Bestimmung vor den Messungen nach 9.3.4
Winkel des Strömungssensors zur Gasströmung	< 15°	Während der Messung
Innenfläche des Abgaskanals	2 % des Wertes	Wird vor den Messungen bestimmt.
Genauigkeit der Position des Strömungssensors im Abgaskanal	≤ 10 % des Abstands zwischen benachbarten Messpunkten	Während der Feldmessung
Winkel der Sonde zum Messquerschnitt (Neigung der Sonde)	≤ 10° vom Messquerschnitt	Während der Feldmessung
Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Strömungsmesseinrichtung	≤ 1 % des Wertes	Anhand des Kalibrierscheins
Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Differenzdruckmessgerätes ^a	≤ 1 % des Wertes	Anhand des Kalibrierscheins für Manometer oder Druckmesswertgeber
Messunsicherheit der Gasdichte im Abgaskanal ^a	≤ 0,05 kg/m ³	Während der Feldmessung
^a Nur anwendbar für Differenzdruckmessgeräte.		

Spezifische Anforderungen für das Flügelanemometer sind im Anhang B festgelegt.

9.5 Messung der Strömungsgeschwindigkeit an Messpunkten innerhalb des Messquerschnitts

Geschwindigkeitsmessungen sind an jedem Messpunkt im Messquerschnitt durchzuführen.

Die Sonde ist in Übereinstimmung mit den in 9.2 festgelegten Messpunkten bis zur markierten Einführungstiefe einzuführen. Bei Differenzdruckmessgeräten ist an jedem Punkt der mittlere Differenzdruck über eine Zeitspanne von mindestens 1 min zu bestimmen, und zwar anhand des Mittelwertes von mindestens drei momentanen Ablesungen des Differenzdrucks. Es kann ein elektronisches Manometer verwendet werden, um eine direkte Ablesung des mittleren Differenzdrucks über mindestens eine 1 min zu erhalten.

Bei dem Verfahren mit 3D-Staudrucksonden können die Messzeiten erheblich länger sein. In derartigen Fällen ist es wichtig sicherzustellen, dass zeitliche Schwankungen der Strömung im Abgaskanal berücksichtigt werden.

Wenn zwei Strömungs-Messeinrichtungen verwendet werden, sind die Messergebnisse mit beiden Messeinrichtungen parallel aufzuzeichnen.

Die Temperatur ist an jedem dafür geeigneten Messpunkt aufzuzeichnen. Die Messungen von Sauerstoff, Wasserdampf und CO₂ sind erforderlichenfalls aufzuzeichnen, oder die Dichte des Abgases ist auf andere Weise zu bestimmen.

Der Luftdruck ist aufzuzeichnen.

Für jede Messachse ist mindestens einmal der statische Druck aufzuzeichnen.

9.6 Qualitätskontrolle nach Durchführung der Messungen

Eine Verstopfungsprüfung ist bei Differenzdrucksonden erforderlich

Diese Prüfung ist bei einer Staudrucksonde vom Typ S nicht erforderlich. Sie muss für jede Druckentnahmestelle einer 3D-Staudrucksonde durchgeführt werden. Sie muss mindestens nach dem Messzeitraum erfolgen. Es ist ratsam, sie nach jeder Netzmessung durchzuführen, da bei einem Nichtbestehen der Prüfung sämtliche Daten seit der vorherigen Prüfung ungültig werden.

Der Differenzdruck an einer Stelle im Abgaskanal ist aufzuzeichnen. Wird eine 3D-Staudrucksonde eingesetzt ist die Staudrucksonde mit Druckluft zu spülen, um die Druckentnahmestellen zu reinigen. Die Messung des Differenzdrucks ist an derselben Stelle zu wiederholen. Wenn beide Ablesewerte nicht um mehr als 5 % voneinander abweichen, sind die Daten der Netzmessung annehmbar. Die Fixpunkt-Ablesungen sind zu kontrollieren, um sicherzustellen, dass sie zwischen diesen Messungen um nicht mehr als 2 % variieren. Falls sie es tun, können die Ablesewerte der Verstopfungsprüfung korrigiert werden, um die Strömungsschwankung zu berücksichtigen.

10 Berechnung der Ergebnisse

10.1 Allgemeines

In der folgenden Berechnung wird davon ausgegangen, dass die physikalisch-chemischen Eigenschaften an sämtlichen Punkten der Messstrecke dieselben sind.

Die Ergebnisse können unter Betriebsbedingungen oder Referenzbedingungen angegeben werden. Die Wahl der Bedingungen, unter denen die Ergebnisse angegeben werden, sollte sich nach dem vorgesehenen Zweck der Messungen und den verfügbaren Daten richten. Wenn die Messungen erfolgen, um eine AMS zu kalibrieren, dann sollten die Strömungsdaten in denselben Einheiten angegeben werden. Wenn die Volumenstrom-Daten zur Berechnung von Massenemissionen verwendet werden, dann sind die Daten zum Volumenstrom und zur Konzentration unter denselben Bedingungen anzugeben. Um zusätzliche Unsicherheitskomponenten zu vermeiden, sollten unnötige Umwandlungen zwischen Bedingungen vermieden werden. Diese bedeutet zum Beispiel, dass es, soweit möglich besser ist, sowohl Konzentrationsdaten als

auch Strömungsdaten unter feuchten (Betriebs-)Bedingungen zu messen. Dadurch ist die Messung der Wasserdampfkonzentration zur Umrechnung auf trockene Bedingungen nicht notwendig. Infolge dessen kann die Unsicherheitskomponente durch die Messung der Wasserdampfkonzentration vermieden werden.

10.2 Messung der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit an jedem Punkt i im Messquerschnitt v_i wird mit dem Differenzdruckmessgerät oder dem Flügelrad-Anemometer bestimmt (siehe Anhänge A und B).

10.3 Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit

Die mittlere Axialgeschwindigkeit $\bar{v}_v$, in m/s, über den Messquerschnitt ist gegeben durch:

$$\bar{v}_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3)$$

Dabei ist

$i, i = 1 \text{ bis } n$ der i -te Messpunkt;

v_i die lokale Geschwindigkeit am Messpunkt i in m/s.

ANMERKUNG Gleichung (3) gilt nur, wenn die Geschwindigkeit an Flächen gleicher Teilflächen bestimmt wird.

10.4 Korrektur der mittleren Geschwindigkeit für Wandeffekte

Die starke Krümmung des Geschwindigkeitsprofils in Wandnähe wird durch das relativ grobe Messraster nach EN 15259 nicht vollständig erfasst, woraus sich eine leichte Überbewertung des Volumenstroms ergibt. EN ISO 16911-1 ermöglicht dem Betreiber, in Übereinstimmung mit dem Prüfverfahren US EPA Method 2H [17], die Auswahl eines Standardwerts des Ausgleichsfaktors für die Wandeffekte (WAF, en: wall adjustment factor), der als Multiplikator des in einem Abgaskanal mit rundem Querschnitt gemessenen mittleren Volumenstroms, verwendet wird. Der Standardwert des WAF beträgt für glattwandige Abgaskanäle 0,995 und für rauwandige Kanäle aus Ziegeln oder Mörtel 0,99. Die Anwendung des WAF führt daher zu einer Verringerung des Volumenstroms von 0,5 % bis 1,0 %. Standardwerte für Abgaskanäle mit rechteckigem Querschnitt können unter Anwendung einer Vorgehensweise entsprechend dem Prüfverfahren US EPA Conditional Test Method CTM-041 [13] berechnet werden.

$$\bar{v}_c = \bar{v} f_{WA} \quad (4)$$

Dabei ist

$\bar{v}_c$ die korrigierte mittlere Geschwindigkeit, in m/s;

$\bar{v}$ die mittlere Geschwindigkeit, in m/s;

f_{WA} der Wandeffektanpassungsfaktor.

ANMERKUNG US EPA Method 2H [17] definiert auch ein Verfahren zur Berechnung des WAF auf der Grundlage von Messungen der Geschwindigkeit in Wandnähe in Abgaskanälen mit einem Durchmesser von mehr als 1,0 m, vorausgesetzt der gemessene WAF liegt nicht unter 0,97. US EPA CTM-041 [13] definiert einen vergleichbaren Ansatz für Abgaskanäle mit rechteckigem Querschnitt, wobei berücksichtigt wird, dass unter diesen Umständen die Wandeffekte aus folgenden Gründen stärker sein können: das Verhältnis von Umfang zu Querschnittsfläche ist größer; die Prüfpunkte befinden sich relativ weit von der Wand entfernt und die Ecken des Abgaskanals unterliegen verstärkten Wandeffekten von zwei aneinander angrenzenden Wänden.

10.5 Berechnung des Volumenstrom aus der mittleren Geschwindigkeit

Der Volumenstrom unter Betriebsbedingungen, $q_{V,w}$, in m^3/s , ist durch Gleichung (5) gegeben:

$$q_{V,w} = \bar{v} A_I \quad (5)$$

Dabei ist

$\bar{v}$ die mittlere Geschwindigkeit in m/s ;

A_I die Fläche der Messebene in m^2 .

10.6 Umrechnung der Ergebnisse auf Normbedingungen

10.6.1 Allgemeines

Falls erforderlich, wird der Volumenstrom nach den Gleichungen in 10.6.3 bis 10.6.4 auf Normbedingungen umgerechnet.

10.6.2 Umrechnung des Volumenstroms auf Normbedingungen

Der Volumenstrom kann als trockenes Abgas unter Normbedingungen für Temperatur und Druck, d. h. 273,15 K und 101,325 kPa, angegeben werden.

Wenn der Schadstoff in Bezug auf einen Bezugssauerstoffgehalt angegeben wird, so muss auch der Volumenstrom in Bezug auf dieselben Bedingungen berechnet werden.

Bei der Berechnung der Messunsicherheit des auf Normbedingungen bezogen Volumenstroms müssen die Messunsicherheiten der Messgrößen in Bezug auf diese Umrechnungen berücksichtigt werden.

10.6.3 Trockener Volumenstrom bei Normbedingungen

Der trockene Volumenstrom unter Normbedingungen hinsichtlich Temperatur und Druck, $q_{V,0d}$, in m^3/s , ist gegeben durch:

$$q_{V,0d} = q_{V,w} \times \frac{P_c}{101,325} \times \frac{273,15}{T_c} \times \frac{100 - \varphi_{\text{H}_2\text{O}}}{100} \quad (6)$$

Dabei ist

$q_{V,w}$ der Betriebsvolumenstrom in m^3/s ;

P_c der absolute Druck im Abgaskanal auf der Messstrecke in kPa;

T_c die Abgastemperatur im Messquerschnitt, in K;

$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$ der Wasserdampfgehalt des Abgases in Prozent (Volumenanteil).

10.6.4 Umrechnung des Volumenstroms für eine Norm-Sauerstoffkonzentration

Der trockene Volumenstrom bei Normbedingungen und bei Bezugs-Sauerstoffkonzentration, $q_{V,0d,\text{O}_2,\text{ref}}$, in m^3/s , ist gegeben als

$$q_{V,0d,\text{O}_2,\text{ref}} = q_{V,0d,\text{O}_2} \times \frac{21 - \varphi_{\text{O}_2,d}}{21 - \varphi_{\text{O}_2,\text{ref}}} \quad (7)$$

Dabei ist

$q_{V,0d,O_2}$	der trockene Volumenstrom bei Normbedingungen und bei der tatsächlichen Sauerstoffkonzentration in m^3/s ;
$\varphi_{O_2,ref}$	der Bezugs-Sauerstoffgehalt in Prozent (Volumenanteil);
$\varphi_{O_2,d}$	der Sauerstoffgehalt, gemessen im Abgaskanal während der Netzmessung bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen in Prozent (Volumenanteil).

11 Bestimmung der Messunsicherheit der Ergebnisse

Für die dokumentierten Messergebnisse muss eine Unsicherheitsbilanz aufgestellt werden. Die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit ist in ISO/IEC Guide 98-3 und ISO 20988 beschrieben:

- mit Hilfe von Labor- und Feldprüfungen sind die mit den Verfahrenskenngrößen verbundenen Standardmessunsicherheiten nach ISO/IEC GUIDE 98-3 zu bestimmen, die in die Berechnung der Unsicherheitsbilanz einfließen;
- durch Kombinieren sämtlicher Standardmessunsicherheiten nach ISO/IEC GUIDE 98-3 ist die Unsicherheitsbilanz zu berechnen, einschließlich der Messunsicherheiten bei der Kalibrierung der Messeinrichtungen und jeglicher Unsicherheiten infolge der Umrechnung auf vorgegebene Bezugsbedingungen. Falls erforderlich, sind Unsicherheiten infolge von Wandeffekten und Drallströmung zu berücksichtigen;
- Werte der Standardmessunsicherheit, die weniger als 5 % der maximalen Standardmessunsicherheit betragen, können vernachlässigt werden;
- es ist die Gesamtunsicherheit beim gemessenen Wert und den vorgegebenen Bezugsbedingungen zu berechnen;
- Unsicherheitsbeiträge aufgrund der Bestimmungen der Kanalfäche sind zu berücksichtigen. Das sollte die Unsicherheiten der Messeinrichtungen und der Schornsteingeometrie einbeziehen. Ein Beispiel ist in Anhang D angegeben.
- Unsicherheitsbeiträge aufgrund von Wandeffekten können dadurch bestimmt werden, dass die Verwendung eines nach 10.4 spezifizierten Faktors erwogen wird.
- Unsicherheitsbeiträge aufgrund von Drallströmung können dadurch vermindert werden, dass den in EN ISO 16911-1 beschriebenen Methoden zum Justieren der Volumenstrommesseinrichtung gefolgt wird.

ANMERKUNG Die Bewertung der Punktmessgeräte im Rahmen der Labortests zeigte, dass der maximale Effekt bei Abweichung von bis zu 15° zur Strömungsrichtung weniger als 1 % der gemessenen Geschwindigkeit beträgt.

Ein erläuterndes Unsicherheitsbudget für Messungen mit Differenzdruckmessgeräten ist im Anhang F dargestellt, Beispiele für andere Volumenstrombestimmungsmethoden sind in den entsprechenden Anhängen beschrieben.

12 Bewertung des Verfahrens

Die in EN ISO 16911-1 beschriebenen Messverfahren wurden bei drei Validierungsstudien beurteilt (Referenz [26]).

Die Validierungsstudien wurden in zwei Teile unterteilt:

- Laborprüfungen in einem Windkanal mit einer Reihe von Messreihen einschließlich manueller Verfahren (SRM) und automatischer Messverfahren (AMS);
- Feldprüfungen in zwei Anlagenstandorten mit einer Reihe von Messreihen einschließlich manueller Verfahren (SRM) und kontinuierlich registrierenden Messeinrichtungen (AMS).

Ausführliche Berichte zu diesen Validierungsstudien sind über das Sekretariat des CEN/TC 264 erhältlich und in Anhang G im Überblick dargestellt.

Die Beurteilung der Feldvalidierungs-Daten nach ISO 20988 liefert die folgenden Ergebnisse. Die Standardmessunsicherheit des Messergebnisses y aus der Anwendung eines manuellen Strömungsmessverfahrens im Bereich 17,8 m/s bis 21,2 m/s beträgt $u(y) = 0,49$ m/s. Die erweiterte Messunsicherheit für 95 % des Messergebnisses y aus der Anwendung eines manuellen Geschwindigkeitsmessverfahrens im Bereich 17,8 m/s bis 21,2 m/s beträgt $U_{0,95}(y) = 0,98$ m/s.

Es ist zu erwarten, dass der 95 %-Vertrauensbereich $[y_R - U_{0,95}(y) : y_R + U_{0,95}(y)]$ $p = 95$ % der Messwerte umfasst. Es hat sich gezeigt, dass der Bereich $p = 97,5$ % der bewerteten 62 Messergebnisse $y(k,j)$ umfasst. Demzufolge wird die erweiterte Messunsicherheit $U_{0,95}(y) = 0,98$ m/s als ein angemessenes Maß der Messunsicherheit angesehen.

Die bestimmten Messunsicherheiten sind daher auf die Messung des mittleren Volumenstroms eines Abgaskanals in m/s mit Hilfe eines Rasters aus punktuellen Geschwindigkeitsmessungen anwendbar.

Anhang A (normativ)

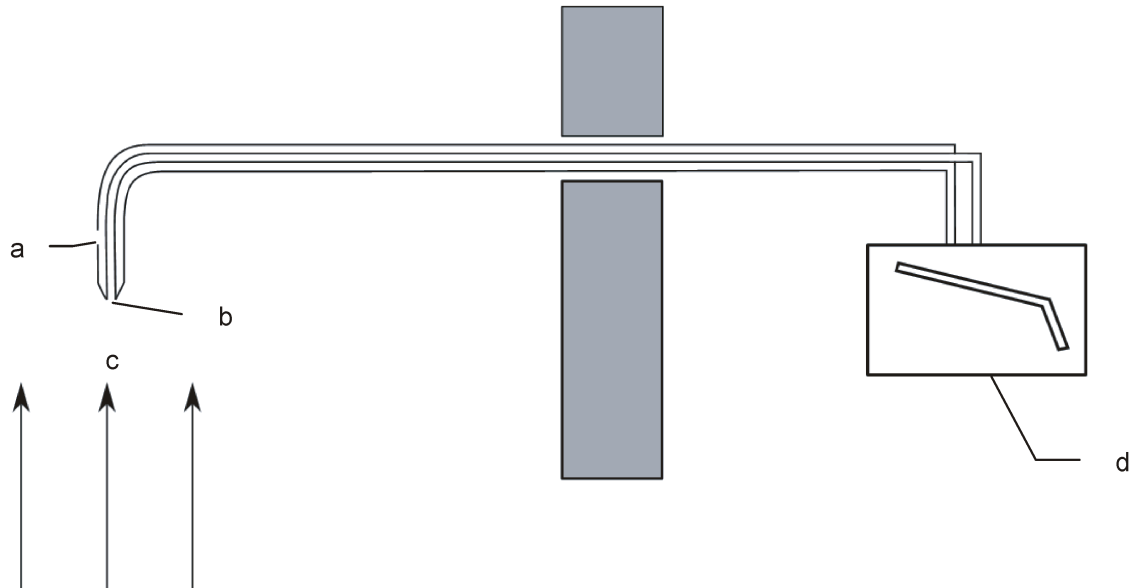
Messung der Geschwindigkeit mit differenzdruckbasierten Techniken

A.1 Prinzip der differenzdruckbasierten Technik

Das Prinzip der Geschwindigkeitsbestimmung in einem Gas mit Hilfe der Messung des Differenzdrucks ist in ISO 3966 [3] beschrieben. Mit einer Staudrucksonde kann der Differenzdruck in einem Bereich des Messquerschnitts bestimmt werden. Bild A.2 ist eine schematische Darstellung einer Staudrucksonde vom Typ L; die Gesetzmäßigkeiten sind jedoch bei allen Konstruktionsweisen von Staudrucksonden dieselben.

Es werden mindestens zwei Druckmessstellen in der Strömung ausgerichtet, eine an der der Staudruck, p_2 , gemessen wird, und eine oder mehrere Stellen, an der bzw. denen der statische Druck, p_3 , gemessen wird. Die Stelle zur Messung des statischen Drucks kann bei einer Staudrucksonde von der Bauart L aus einem Kranz von Bohrungen um das Staurohr herum bestehen oder wie bei der Bauart S aus einer einzigen „Nachlauf“-Druckmessstelle. In 3D-Staudrucksonden können zusätzliche separate Druckmessstellen vorhanden sein, um den Strömungsvektor in drei Dimensionen zu bestimmen. Der Druck an diesen Öffnungen wird innerhalb der Staudrucksonde an ein Differenzdruckmessgerät übertragen, das außerhalb des Abgaskanals montiert ist. An diesem Punkt wird die Druckdifferenz gemessen. Die Messung des Differenzdrucks kann entweder mit einem digitalen Manometer oder einem manuellen Schräghrohmanometer durchgeführt werden.

Die Gleichung (A.1) wird zur Herleitung der Geschwindigkeit aus dem Differenzdruck verwendet.



Legende

- a p_3 statischer Druck
- b p_2 Staupunkt
- c v Strömung
- d Δp Messung des Differenzdrucks

Bild A.1 — Prinzip der differenzdruckbasierten Geschwindigkeitsbestimmung

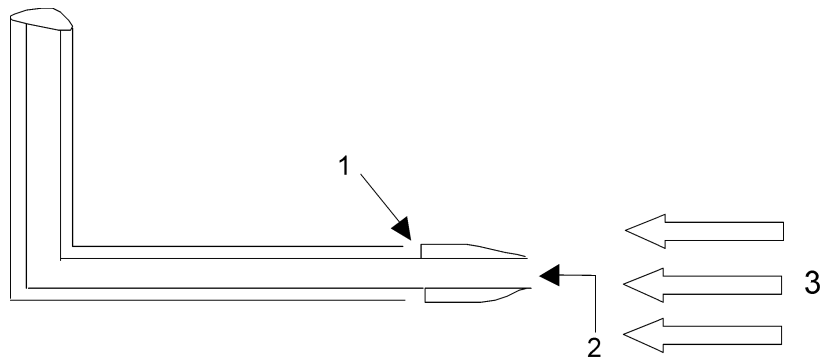
A.2 Messgeräte

A.2.1 Staudrucksonden

A.2.1.1 Typ L

Dieser Typ ist eine Basis-Staudrucksonde, die aus einem Rohr besteht, das direkt in die Fluidströmung weist. Da dieses Rohr ein Fluid enthält, kann ein Druck gemessen werden. Das sich bewegende Fluid wird zum Stillstand gebracht (gestaut), da kein Auslass vorliegt, durch den sich die Strömung fortsetzen könnte. Dieser Druck ist der Staudruck des Fluids, auch bekannt als Gesamtdruck oder (insbesondere in der Luftfahrt) als Pitotdruck.

Bild A.2 zeigt das Messprinzip einer Staudrucksonde vom Typ L.



Legende

- 1 p_3 statischer Druck
- 2 p_2 Stau-/Gesamtdruck
- 3 v Strömungsrichtung

Bild A.2 — Schematische Darstellung der Staudrucksonden vom Typ L