

DIN EN 17628



ICS 13.040.40

Einsprüche bis 2021-01-27

Entwurf

**Fugitive und diffuse Emissionen von allgemeinem Interesse für
Industriebereiche –
Verfahren zur Bestimmung diffuser Emissionen von flüchtigen organischen
Verbindungen in die Atmosphäre;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17628:2020**

Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors –
Standard method to determine diffuse emissions of volatile organic compounds into the
atmosphere;
German and English version prEN 17628:2020

Emissions fugitives et diffuses concernant divers secteurs industriels –
Méthode normalisée pour la détermination des émissions diffuses de composés organiques
volatils dans l'atmosphère;
Version allemande et anglaise prEN 17628:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-11-27 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

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

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

Gesamtumfang 200 Seiten

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

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17628:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche/nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 134-04-01 AA „Emissionsmessverfahren“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

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

<i>Titel de:</i>	Fugitive und diffuse Emissionen von allgemeinem Interesse für Industriebereiche — Verfahren zur Bestimmung diffuser Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen in die Atmosphäre
<i>Titel en:</i>	Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors — Standard method to determine diffuse emissions of volatile organic compounds into the atmosphere
<i>Titel fr:</i>	Emissions fugitives et diffuses concernant divers secteurs industriels — Méthode normalisée pour la détermination des émissions diffuses de composés organiques volatils dans l'atmosphère

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Symbole und Abkürzungen	11
5 Kurzbeschreibung	11
6 Messziele	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Quantifizierung der Emissionen eines Standorts	12
6.3 Quantifizierung der Emissionen eines Bereichs	13
6.4 Quantifizierung von Emissionen aus Anlagenteilen	13
6.5 Lokalisierung von Emissionsquellen/Lecks	13
7 Datenqualitätsziele	14
7.1 Allgemeines	14
7.2 Quantifizierung der Emissionen von Standorten	14
7.3 Quantifizierung der Emissionen von Bereichen	14
7.4 Quantifizierung der Emissionen von Anlagenteilen	15
7.5 Erkennung/Lokalisierung von Emissionsquellen	15
8 Übersicht über die Verfahren	15
8.1 Anwendbarkeit und Einschränkungen der Messtechniken	15
8.1.1 Anwendbarkeit	15
8.1.2 Einschränkungen	17
8.2 Messverfahren	18
8.2.1 Allgemeines	18
8.2.2 Differential Absorption Lidar (DIAL)	18
8.2.3 Solar Occultation Flux (SOF)	20
8.2.4 Tracer-Korrelation (TC)	22
8.2.5 Optische Gasdetektion (OGI)	24
8.2.6 Inverse Ausbreitungsrechnung (RDM)	26
9 Meteorologische Daten und Messungen	28
10 Messstrategie und Planung von Messkampagnen	30
10.1 Allgemeines	30
10.2 Messziele	30
10.3 Messplanung	31
10.3.1 Festlegung des Messplans	31
10.3.2 Zu überprüfende Gebiete und Anlagen	31
10.3.3 Technischer Leiter und Personal	31
10.3.4 Planung der Messtermine	32
10.3.5 Planung kombinierter Messungen	32
10.4 Vorbereitung der Messkampagne	32
10.4.1 Vorbereitungen durch den Anlagenbetreiber	32
10.4.2 Vorbereitungen durch den Messdienstleister	33

10.4.3	Vorbereitungen nach dem Eintreffen an der Anlage.....	33
10.5	Durchführung der Messungen.....	33
10.6	Berechnung der Ergebnisse und der Messunsicherheit	33
10.6.1	Berechnung der Ergebnisse.....	33
10.6.2	Ermittlung der Messunsicherheit.....	33
10.7	Meteorologie	38
11	Berichterstattung.....	39
12	Ergebnisse der Validierungs- und Anwendungs-Feldstudien.....	40
12.1	Allgemeines	40
12.2	Erste Kampagne: Validierungsstudie.....	40
12.3	Zweite Kampagne: Nachweis der Anwendbarkeit der Verfahren	41
Anhang A (normativ) DIAL-Verfahren.....		42
A.1	Leistungsanforderungen	42
A.2	Anwendung des Verfahrens.....	43
A.2.1	Vor der Kampagne	43
A.2.2	Aufbau und erste Aufgaben	44
A.2.3	Tägliche Aufgaben.....	45
A.2.4	Messstrategie	46
A.3	Qualitätskontrolle	48
A.3.1	Allgemeines	48
A.3.2	Spektroskopische Kalibrierverfahren.....	48
A.3.3	Kalibrierung meteorologischer Sensoren.....	49
A.4	Datenanalyse.....	49
A.4.1	Allgemeines	49
A.4.2	Subtraktion des Hintergrunds.....	50
A.4.3	Normalisierung von Schwankungen der übertragenen Energie	50
A.4.4	Berechnung der pfadintegrierten Konzentration	50
A.4.5	Ableitung von bereichsaufgelösten Konzentrationen	50
A.4.6	Berechnung von Emissionsraten	50
A.5	Berichterstattung.....	51
Anhang B (normativ) SOF-Verfahren		52
B.1	Leistungsanforderungen	52
B.2	Anwendung des Verfahrens.....	52
B.2.1	Vor der Kampagne	52
B.2.2	Aufbau und erste Aufgaben	53
B.2.3	Tägliche Aufgaben.....	54
B.2.4	Messstrategie	55
B.3	Qualitätskontrolle	56
B.3.1	Allgemeines	56
B.3.2	Spektroskopische Kalibrierverfahren.....	56
B.3.3	Kalibrierung meteorologischer Sensoren.....	57
B.3.4	Erforderliche Qualitätskontrollprüfungen im Feld	57
B.4	Datenanalyse.....	58
B.4.1	Allgemeines	58
B.4.2	Berechnung von Säulenwerten	58
B.4.3	Berechnung von Emissionsraten	59
B.4.4	Schätzung und Lokalisierung von Emissionsquellen	60
B.4.5	Datenvalidierungsverfahren.....	60
B.5	Berichterstattung.....	62
Anhang C (normativ) OGI-Verfahren.....		63
C.1	Anwendung des Verfahrens.....	63
C.1.1	Allgemeines	63
C.1.2	Einrichtung, erste Aufgaben und Erkennungsplanung	63

C.1.3	Durchführung der Analyse	64
C.2	Qualitätskontrolle	66
C.2.1	Prüfverfahren	66
C.3	Datenanalyse	67
C.3.1	Allgemeines	67
C.3.2	Datenbank-Management	67
C.3.3	Berechnung und Quantifizierung der Emissionsrate	67
C.4	Berichterstattung	67
C.4.1	Allgemeines	67
C.4.2	Anforderungen des Kunden.....	67
Anhang D (normativ) TC-Verfahren		68
D.1	Leistungsanforderungen.....	68
D.2	Anwendung des Verfahrens.....	68
D.2.1	Vor der Kampagne.....	68
D.2.2	Aufbau und erste Aufgaben.....	69
D.2.3	Tägliche Aufgaben	70
D.2.4	Messstrategie	71
D.3	Qualitätskontrolle	72
D.3.1	Allgemeines	72
D.3.2	Kalibrierung von Gassensoren	72
D.3.3	Kalibrierung meteorologischer Sensoren	73
D.3.4	Kalibrierung der Tracergas-Abgabereinrichtung	73
D.3.5	Erforderliche Qualitätskontrollprüfungen im Feld	73
D.4	Datenanalyse	73
D.4.1	Berechnung von Emissionsraten	73
D.4.2	Schätzung und Lokalisierung von Emissionsquellen	74
D.4.3	Datenvalidierungsverfahren	74
D.5	Berichterstattung	75
Anhang E (normativ) RDM-Verfahren.....		76
E.1	Allgemeines	76
E.2	Leistungsanforderungen.....	76
E.3	Anwendung des Verfahrens.....	77
E.3.1	Vor der Kampagne.....	77
E.3.2	Aufbau und erste Aufgaben.....	78
E.3.3	Tägliche Aufgaben	79
E.3.4	Messstrategie	80
E.4	Qualitätskontrolle	81
E.4.1	Allgemeines	81
E.4.2	Analysegerät-Kalibrierverfahren	82
E.4.3	Kalibrierung meteorologischer Sensoren	82
E.5	Datenanalyse	83
E.5.1	Allgemeines	83
E.5.2	Hintergrundsubtraktion	83
E.5.3	Umrechnung der Konzentration entsprechend der Speziierung.....	83
E.5.4	Berechnung von Emissionsraten	83
Anhang F (informativ) Meteorologie.....		84
F.1	Allgemeines	84
F.2	Spezielle Platzierungsgrundsätze für die Anwendung an komplexen Standorten	85
F.3	Höhe(n)	86
F.4	Auswahl der Instrumente für Windgeschwindigkeit und Windrichtung	87
F.5	Leistungsanforderungen für Windgeschwindigkeit und Windrichtung	88
F.6	Lidar-Profile	88
F.7	Emissionsraten-Berechnungen	89
F.8	Für verschiedene Messstrategien geeignete Mittelungszeit	89

F.9	Räumliche Abweichung (physische Trennung der Wind- und Konzentrationsmessung)	92
F.10	Berücksichtigung geringer Windgeschwindigkeit und atmosphärischer Stabilität	93
F.11	Auswahl von Instrumenten für andere relevante Daten (Sonneneinstrahlung, Temperatur, Sichtbarkeit, Regen, Zeitreferenz).....	95
F.11.1	Allgemeines	95
F.11.2	Zeitreferenz	95
F.11.3	Messung des atmosphärischen Drucks	95
F.11.4	Messung der Lufttemperatur	95
F.11.5	Messung des Feuchtegehalts der Luft	96
F.11.6	Qualitätssicherung.....	96
F.12	Berichterstattung.....	96
Anhang G (informativ)	Beispiel für die Berechnung der Messunsicherheit.....	97
Literaturhinweise.....		99

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17628:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben.

Einleitung

0.1 Hintergrund

Dieses Dokument wurde erarbeitet, um einen Rahmen für die Auswahl und Anwendung von Messverfahren zur Bestimmung (Erkennung, Identifizierung und/oder Quantifizierung) der Emission flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) aus diffusen Quellen in Luft, insbesondere aufgrund von deren Lagerung, Transport und Handhabung (Verladung/Entladung) in bestimmten Industriebereichen, zur Verfügung zu stellen. Hauptsächlich dient es dazu, die Anforderungen des Merkblatts über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) (Best Available Technique Reference (BREF) Document) für das Raffinieren von Mineralöl und Gas [1], einschließlich des Durchführungsbeschlusses der Kommission [2] über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU [3] über Industrieemissionen in Bezug auf das Raffinieren von Mineralöl und Gas, zu erfüllen.

VOC-Emissionen aus anthropogenen, biogenen und anderen natürlichen Quellen tragen zur Bildung von Ozon und anderen Schadstoffen in der Atmosphäre bei, die schädlich für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sind. Die Bestimmung des anthropogenen Beitrags kann dazu beitragen, diese Auswirkungen zu reduzieren. Emissionen können durch eine Vielzahl von Aktivitäten entstehen (z. B. Industrieprozesse, Transport, Lagerung und Handhabung von Brennstoffen und Chemikalien, Nutzung von VOC-haltigen Produkten). Emissionsquellen können komplex sein und diffuse Emissionen sind schwierig zu bestimmen. Hierfür wurden bisher nicht genormte Mess- und Schätzverfahren eingesetzt. Durch die Festlegung einheitlicher Kriterien und den Nachweis ihrer Anwendung mit definierten Messverfahren sollte sich die Bestimmung diffuser VOC und deren Kontrolle mit den daraus entstehenden Vorteilen verbessern lassen.

0.2 Europäischer Kontext

Nationale Ziele zur Minderung von VOC-Emissionen in die Luft werden in europäischen Ländern durch das Göteborg-Protokoll [4] des UN-ECE Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) und zusätzlich für die EU-Mitgliedsstaaten und die EU als Ganzes durch die Richtlinie über nationale Emissionshöchstmenge (2016/2284/EU [5]) geregelt. Beide Regelungen schreiben jährliche Emissionsberichte vor.

Nationale Emissionen sind die Summe der Emissionen der Sektoren. Diese Emissionen sind in der EU zur Einhaltung der nationalen Verpflichtung geregelt. Für die größten Industriesektoren ist die Richtlinie über Industrieemissionen (Richtlinie 2010/75/EU [3], IED) das wichtigste Instrument. Sie legt Mindestemission für bestimmte Schadstoffe in den Schlüsselsektoren und eine formale Anleitung für Genehmigungsbehörden über Emissionen in Luft und Wasser fest, angegeben als Konzentrationen oder Frachten, die durch die Anwendung der besten verfügbaren Techniken (BVT) erreicht werden können. Schlussfolgerungen zu den BVT werden im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht und sind rechtswirksam. Sie werden durch einen formalen Prozess (Sevilla-Prozess) der Datenerhebung und -begutachtung, der in den BVT-Merkblättern festgehalten ist, abgeleitet. BVT-Merkblätter liefern den Zusammenhang und eine Anleitung zur Interpretation der BVT-Schlussfolgerungen. Die IED sieht die Überprüfung und gegebenenfalls Überarbeitung aller Sektor-BVT-Merkblätter in einem 8-jährigen Zyklus vor.

Dieses Dokument unterstützt BVT-Schlussfolgerungen, die die Beurteilung diffuser VOC-Emissionen und die Berichterstattung darüber vorschreiben. Diese sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments:

- Mineralöl- und Gasraffinerien [2] (BVT 6);
- Abwasser- und Abgasbehandlungssysteme in der Chemiebranche [6] (BVT 5);
- Abgasmanagement- und Behandlungssysteme in der Chemiebranche (BVT 22) [7].

Allgemeine Informationen zur Überwachung diffuser Emissionen können dem JRC-Bericht über die Überwachung der Emissionen aus IED-Anlagen in Luft und Wasser (EUR 29261 EN) [8] entnommen werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt einen Rahmen zur Bestimmung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) in die Atmosphäre fest. Es definiert ein System von Verfahren zur Erkennung und/oder Identifizierung und/oder Quantifizierung von VOC-Emissionen aus industriellen Quellen. Diese Verfahren umfassen die optische Gasdetektion (en: Optical Gas Imaging (OGI)), Differential Absorption Lidar (DIAL), Solar Occultation Flux (SOF), Tracer-Korrelation (en: Tracer Correlation (TC)) und inverse Ausbreitungsrechnung (en: Reverse Dispersion Modelling (RDM)). Das Dokument legt die Methodik für die Ausführung der genannten Verfahren fest und definiert darüber hinaus die Leistungsanforderungen und Möglichkeiten dieser direkten Messverfahren sowie die Anforderungen an die Ergebnisse und ihre Messunsicherheiten.

Dieses Dokument richtet sich vor allem an die petrochemische, ölverarbeitende und chemische Industrie, die VOC transportieren, verarbeiten, lagern und/oder exportieren und zielt auch auf VOC-Emissionen aus der Erdgas verarbeitenden/aufbereitenden Industrie und die Lagerung von Erdgas und ähnlichen Brennstoffen.

Dieses Dokument gilt für diffuse VOC-Emissionen in die Atmosphäre, schließt jedoch VOC-Emissionen in Wasser und feste Materialien wie Böden aus. Es ergänzt EN 15446 [9], das die Erkennung, Lokalisierung von Quellen (einzelne Leckagen aus Anlagen und Rohrleitungen) und die Quantifizierung fugitiver VOC-Emissionen innerhalb des Anwendungsbereichs des Programms für Leckerkennung und -reparatur (en: leak detection and repair, LDAR) abdeckt.

Dieses Dokument wurde für Nichtmethan-VOC validiert, die Methodik ist jedoch grundsätzlich auf Methan und andere Gase anwendbar.

Dieses Dokument legt Verfahren zur Bestimmung (Erkennung, Identifizierung und/oder Quantifizierung) von VOC-Emissionen während der Überwachungszeiträume fest. Es behandelt nicht die Extrapolation von Emissionen auf Zeiträume über die Überwachungszeiträume hinaus.

2 Normative Verweisungen

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

EN 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.

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

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

3.1

Erkennung

Erkennen der Anwesenheit einer Emissionsquelle in einem bestimmten Bereich

3.2

Lokalisierung

Bestimmung der Position einer Emission mit einer bestimmten Genauigkeit

3.3

Quantifizierung

Bestimmung einer Emissionsrate

3.4

Standort

Gebiet innerhalb eines festgelegten Umkreises, in dem Emissionen stattfinden könnten

3.5

Bereich

begrenztes Gebiet innerhalb eines Standorts mit üblicherweise spezifischer Funktion

3.6

Anlagenteil

begrenzter Teil einer Anlage

3.7

Komponente

Baugruppe oder mechanisches Element eines Anlagenteils

3.8

flüchtige organische Verbindung

VOC (en: volatile organic compound)

organische Verbindung mit einem Dampfdruck von 0,01 kPa oder mehr bei 293,15 K, oder einer entsprechenden Flüchtigkeit unter den jeweiligen Verwendungsbedingungen

[QUELLE: Richtlinie 2010/75/EC [3], geändert]

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Verwendung des Begriffs VOC ist darauf zu achten, dass hierfür verschiedene Definitionen gebräuchlich sind. In einigen Fällen schließt VOC Methan oder Methan und Ethan aus. Es wird empfohlen, eindeutig anzugeben, welcher Bereich von Verbindungen gemeint ist.

3.9

organische Verbindung

Verbindung, die zumindest das Element Kohlenstoff und eines oder mehrere der Elemente Wasserstoff, Halogen, Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, Silizium oder Stickstoff enthält, ausgenommen Kohlenstoffoxide sowie anorganische Carbonate und Bicarbonate

[QUELLE: Richtlinie 2010/75/EC [3]]

3.10

Emission

Abgabe von Substanzen in die Atmosphäre

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Begriff umfasst vier Arten von Emissionsquellen:

- Bilanzierte geführte Emissionen (aus überwachten Kaminen)
- Nichtbilanzierte geführte Emissionen (z. B. aus Entlüftungen, Fackeln)
- Fugitive Emissionen (Leckagen z. B. aus Ventilen, Dichtungen)
- Flächenemissionen (z. B. Wasseraufbereitungsbecken, Kokslager)

3.11

fugitive Emission

an die Atmosphäre durch Dichtigkeitsverluste abgegebene Emissionen, die aus als dicht geltenden Bauelementen entweichen

[QUELLE: EN 15446:2008 [9]]

3.12

diffuse Emission

aus einem Standort oder einer Einrichtung in die Atmosphäre freigesetzte Emission, die nicht über festgelegte Emissionspunkte abgeleitet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Begriff umfasst die Summe verschiedener nichtbilanzierter geführter Emissionen, fugitive Emissionen und Flächenemissionen.

3.13

erweiterte Messunsicherheit

Kennwert, der einen Bereich um das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnten

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Anteil kann als Überdeckungswahrscheinlichkeit oder Vertrauensniveau des Bereichs angesehen werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Um dem durch die erweiterte Messunsicherheit gekennzeichneten Bereich ein spezielles Vertrauensniveau zuzuordnen, sind explizite oder implizite Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung erforderlich, die durch das Messergebnis und die kombinierte Standardunsicherheit charakterisiert wird. Das Vertrauensniveau, das diesem Bereich zugeordnet werden kann, kann nur in dem Maße bekannt sein, wie solche Annahmen gerechtfertigt sind.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die erweiterte Messunsicherheit wird in Abschnitt 5 der Empfehlung UNC-1 (1980) Gesamtunsicherheit genannt.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008 [10]]

3.14

Nachweisgrenze

Mindestkonzentration einer Substanz, die ein auswertbares Signal hervorruft, das der doppelten Standardabweichung bei null entspricht

[QUELLE: EN 12619:2013 [11]]

4 Symbole und Abkürzungen

API	American Petroleum Institute
DIAL	Differential Absorption Lidar
DQO	Datenqualitätsziel (en: Data Quality Objective)
LDAR	Leckerkennung und -reparatur (en: Leak Detection And Repair)
LIDAR	Light Detection and Ranging
OGI	Optische Gasdetektion (en: Optical Gas Imaging)
RDM	Inverse Ausbreitungsrechnung (en: Reverse Dispersion Modelling)
SOF	Solar Occultation Flux
TC	Tracer-Korrelation (en: Tracer Correlation)
VOC	Flüchtige organische Verbindung (en: Volatile Organic Compound)

5 Kurzbeschreibung

Dieses Dokument legt den Rahmen für eine Reihe sich ergänzender Verfahren (DIAL, SOF, OGI, TC und RDM) zur Bestimmung diffuser VOC-Emissionen fest. Es definiert Leistungsanforderungen und Qualitätssicherungsverfahren zur Sicherstellung der korrekten Anwendung jedes Verfahrens. Allgemeine Aspekte werden im Hauptteil dieses Dokuments behandelt, verfahrensspezifische Aspekte und Anforderungen in den jeweiligen Anhängen.

Die Verfahren ergänzen sich gegenseitig, da jedem Verfahren eine bestimmte Aufgabe im VOC-Emissionsmessprogramm zugewiesen ist. Während regelmäßige Untersuchungen von Anlagen beispielsweise mithilfe des Leckerkennungs- und Reparaturprogramms (LDAR) nach EN 15446 [9] vorgenommen werden können, können Untersuchungen von Anlagen und anderen potenziellen Emissionsquellen (Tanks, Verladearbeiten usw.) mit OGI nach diesem Dokument durchgeführt werden. Regelmäßige Untersuchungen des gesamten Standorts oder ausgewählter Bereiche desselben können mit DIAL und/oder SOF vorgenommen werden. Identifizierte spezifische Quellen können mit TC- und RDM-Verfahren quantifiziert werden.

6 Messziele

6.1 Allgemeines

Ein auf diffuse Emissionen ausgerichtetes VOC-Messprogramm hat drei Hauptziele: die Erkennung von Emissionsquellen, ihre Lokalisierung und die Quantifizierung der Emissionen. Diffuse Emissionen können aus Lecks entweichen, die die Erkennung und Lokalisierung der spezifischen Quelle erfordern. Diffuse Emissionen entstehen auch im üblichen Betrieb, wobei die Quantifizierung Aufschluss über die Größenordnung der Emissionen geben kann und erkennen lässt, ob eine Erkennung und Lokalisierung der Quellen erforderlich ist.

Zur Erreichung dieser Ziele können verschiedene Ansätze gewählt werden. Sie reichen von der Bottom-Up-Untersuchung potenzieller Emissionsquellen bis zur Top-Down-Untersuchung durch Fernerkundung eines Teils oder des gesamten Standorts. Unerwartete Emissionen können dann genauer untersucht werden.

Ausgangsbasis für die Untersuchung möglicher Emissionsquellen sind die Emissionsbilanz des Standorts und die Ergebnisse vorheriger Untersuchungen. Viele diffuse Quellen sind zeitlich veränderlich und gehen auf Betriebsereignisse zurück, die während des Zeitraums einer zu dokumentierenden Untersuchung zu den Emissionen beitragen könnten. Die Ermittlung der zeitlichen Schwankungen spezifischer Emissionsquellen kann eine Messaufgabe sein.

Angesichts der Vielfalt diffuser Emissionen und der vielfältigen Optionen zu ihrer Bestimmung müssen eindeutige und spezifische Messziele für die Messkampagne festgelegt werden. Dies betrifft insbesondere die Auswahl der anzuwendenden Verfahren und die Erwartungen an die Datenqualität. Es sollte beachtet werden, dass alle in diesem Dokument behandelten Verfahren von äußeren und für den Messzeitraum spezifischen Umständen abhängig sind (Witterung, betriebliche Beschränkungen des Standorts usw.) und die Messaufgaben sollten diese Umstände im Detail berücksichtigen.

Die folgenden Elemente müssen bei der Festlegung der Messaufgaben berücksichtigt werden:

- Der Zweck der Messkampagne muss eindeutig festgelegt werden. Dies bedingt Umfang und Leistungen der Kampagne.
- Der Standort oder der/die zu überwachende(n) Bereich(e) muss/müssen festgelegt werden. Für einen Bereich müssen Informationen über die darin enthaltenen Anlagen und deren Komponenten eingeholt werden. Diese müssen durch Informationen zu Prozessströmen und ihren thermodynamischen Zustand entsprechend der vorzunehmenden Messung ergänzt werden.
- Die Art der Messung muss für jeden Bereich festgelegt werden, z. B. die Erkennung, die Erkennung und Lokalisierung einzelner Quellen sowie die Erkennung und Quantifizierung von Emissionen.
- Die räumliche Auflösung der Messung muss festgelegt werden. Dies bedingt die Art der durchzuführenden Messung. Die zur Verfügung stehenden Techniken müssen dabei berücksichtigt werden. Beispielsweise müssen die Ziele mit der räumlichen Auflösung der Techniken vereinbar sein.
- Zur Lokalisierung sollten die Ziele die erforderliche räumliche Auflösung berücksichtigen. Beispielsweise für Anlagen oder, wenn eine Reparatur beauftragt ist, für die Größe der Emissionsquelle.
- Zur Quantifizierung sollten die Ziele ausdrücklich berücksichtigen, wie Emissionen aus verschiedenen Quellen auseinandergehalten werden. Auf Standortebene müssen außerhalb des Standorts gelegene Quellen berücksichtigt werden. Auf Bereichsebene müssen Emissionen aus benachbarten Bereichen berücksichtigt werden usw.
- Zur Quantifizierung sollten Messziele für meteorologische Messungen das Beschaffen notwendiger und geeigneter Daten sicherstellen.
- Die Dauer der Messung muss festgelegt werden. Dauerhafte (stetige) Quellen, Quellen mit im zeitlichen Verlauf z. B. betriebsbedingt schwankenden Emissionen, und unregelmäßige Emissionen sind dabei unterschiedlich zu betrachten.
- Die zu bestimmenden Substanzen müssen definiert werden.

6.2 Quantifizierung der Emissionen eines Standorts

Das DIAL- und das SOF-Verfahren können Emissionen eines gesamten Standorts im Rahmen der durch die Lage und die meteorologischen Bedingungen während des Messzeitraums gegebenen Einschränkungen messen. Die Nähe von VOC-Quellen außerhalb der Standortgrenzen ist zu berücksichtigen, da diese bei der Berechnung der Emissionsrate ausgeschlossen werden müssen. Beide Techniken basieren auf der Bestimmung der Differenz der VOC-Emissionsraten entgegen und in Windrichtung. Sie haben ein Betriebsfenster bezüglich der Windgeschwindigkeit und der Stabilität der Windrichtung. Das Betriebsfenster

des SOF-Verfahrens wird durch die Sonneneinstrahlung bedingt. Diese Einschränkungen sind in den Verfahrensanweisungen dokumentiert.

Die Bestimmung der Emissionen eines Standorts erfordert die Durchführung einer ausreichenden Anzahl an Messungen. Die Verfahrensanweisungen enthalten entsprechende Kriterien. Messungen können unter verschiedenen Windbedingungen durchgeführt werden, um auf systematische Fehler bei der Annahme konstanter Emissionen zu prüfen. Da VOC-Emissionen im Verlauf einer Kampagne sehr wahrscheinlich nicht konstant sind, ist es wichtig, Standortaktivitäten zu dokumentieren und eine Zeitleiste zwischen der Messung und potenziellen Emissionsereignissen im Luv der jeweiligen Messebene vor und während des Messzeitraums festzulegen. Gegebenenfalls während des Messzeitraums auftretende nicht-diffuse VOC-Emissionen (z. B. geführte Emissionen) innerhalb des Quellenbereichs sollten berücksichtigt werden.

Falls Einschränkungen die direkte Bestimmung der Emissionen des gesamten Standorts verhindern, können diese durch die Kombination der Emissionen separater Bereiche erhalten werden. Die Anforderungen an die Bestimmung der Standortemission gelten auch für die Bestimmung der Emission jedes Bereichs. Die Emissionswerte der Bereiche, die Zeitleiste und die Methodik der Kombination sollten dokumentiert werden.

6.3 Quantifizierung der Emissionen eines Bereichs

Die Emission von Bereichen kann mit dem DIAL- und SOF-Verfahren und, mit begrenzter Anwendbarkeit, mit dem RDM- und TC-Verfahren im Rahmen der während des Messzeitraums durch die Lage und die meteorologischen Bedingungen gegebenen Einschränkungen bestimmt werden. Die Nähe von VOC-Quellen außerhalb der Bereichsgrenzen ist zu berücksichtigen, da diese bei der Berechnung der Emissionsrate ausgeschlossen werden müssen.

Messungen können unter verschiedenen Windbedingungen durchgeführt werden, um auf systematische Fehler bei Annahme konstanter Emissionen zu prüfen. Die Subtraktion von außerhalb des Bereichs stammenden Beiträgen sind zu dokumentieren. Da VOC-Emissionen im Verlauf einer Kampagne sehr wahrscheinlich nicht konstant sind, ist es wichtig, Prozess- und Wartungsaktivitäten im entsprechenden Bereich zu dokumentieren und eine Zeitleiste von potenziellen Emissionsereignissen im Luv vor und während des Messzeitraums festzulegen. Verfahrensanweisungen sollten zeitliche Schwankungen der Emissionen von Unsicherheiten bei der Emissionsbestimmung einschließlich der Korrektur für vorgelagerte Quellen trennen. Gegebenenfalls während des Messzeitraums auftretende nicht-diffuse VOC-Emissionen (z. B. geführte Emissionen) innerhalb des Quellenbereichs sollten berücksichtigt werden.

6.4 Quantifizierung von Emissionen aus Anlagenteilen

Messaufgabe ist die Quantifizierung der Emissionsrate aus einem Anlagenteil. Dies kann der Mittelwert der Emission aus verschiedenen Zeiträumen oder eine Zeitreihe von Emissionsraten zur Bestimmung der betriebsbedingten Emissionen sein, z. B. Emissionen aus einem Delayed Coker über dessen Betriebszyklus.

Die Emissionen aus Anlagenteilen können mit den DIAL-, SOF-, RDM- und TC-Verfahren im Rahmen der während des Messzeitraums durch die Lage und die meteorologischen Bedingungen gegebenen Einschränkungen bestimmt werden. Die Nähe von VOC-Quellen außerhalb der Bereichsgrenzen ist zu berücksichtigen, da diese bei der Berechnung der Emissionsrate ausgeschlossen werden müssen.

6.5 Lokalisierung von Emissionsquellen/Lecks

Die Lokalisierung von Emissionsquellen kann in einem Bottom-Up-Verfahren durch Inspektion mit OGI in Erweiterung der LDAR-Praxis nach EN 15446 [9] nicht nur bei (zugänglichen und unzugänglichen) Prozessanlagen, sondern auch bei anderen Bauteilen wie etwa Schwimmdachabdichtungen durchgeführt werden. Dies beinhaltet die systematische Inspektion potenzieller Emissionsquellen und die Dokumentation gefundener Quellen. Das Verfahren wird in der OGI-Verfahrensbeschreibung erläutert.

Alternativ kann die Lokalisierung durch die Ergebnisse von Fernmessungen auf Bereichs- oder Anlagenebene geleitet werden, die die ungefähre Lage der Emissionsquelle anzeigen. Beispielsweise können DIAL- oder SOF-Messungen Emissionen aus einer Gruppe von Tanks signalisieren, die höher als erwartet sind, und mit OGI kann in diesem Fall z. B. eine Inspektion der Dichtungen durchgeführt werden.

DIAL, SOF oder die mobile TC-Untersuchung können die Quelle einer Punkt- oder kleinen Flächenemission unter Umständen direkt anzeigen, wenn die Quelle isoliert ist, nur eine geringe Korrektur für windseitige Quellen erforderlich ist und die Windrichtungen während der Messung eine genaue Triangulation erlauben.

7 Datenqualitätsziele

7.1 Allgemeines

Datenqualitätsziele (DQO) müssen von dem Kunden für die spezifisch durchzuführenden Messungen definiert werden. Je nach den spezifischen Messzielen kann dies zur Abwandlung der für die in den folgenden Abschnitten angegebenen Beispiele genannten DQOs führen. Die DQOs können als Grundlage für die Auswahl der für ein bestimmtes Messziel anzuwendenden Techniken genutzt werden. Zwei DQOs sollten in Bezug auf die Unsicherheit der ausgewiesenen Werte und der Nachweisgrenze definiert werden. Diese ermöglichen die Auswahl geeigneter Techniken und die Entwicklung spezifischer Messpläne. Die in diesem Dokument angegebenen Verfahren definieren, wie diese DQOs für jede Technik ermittelt werden.

Die folgenden Unterabschnitte enthalten Beispiele für mögliche Messziele. Sind keine Anforderungen festgelegt, dann sind die dort genannten DQOs zu verwenden (Standardwerte). Dies sind typische Werte für Raffinerien. Für andere Messaufgaben (z. B. andere Industriestandorte) können andere Werte gelten.

7.2 Quantifizierung der Emissionen von Standorten

Ziel ist die Quantifizierung der Massenemissionsrate für einen gesamten Standort. Sie kann auch als Summe der Emissionen von Teilbereichen berechnet werden.

Die zu kontrollierende Fläche ist üblicherweise $> 500 \text{ m} \times > 500 \text{ m}$.

Das übliche DQO für die Angabe der Emissionen des gesamten Standorts oder den Vergleich der gemessenen mit den geschätzten Emissionen sollte sein:

- Erweiterte Unsicherheit: 30 % für den mittleren Massenemissionswert
- Nachweisgrenze: etwa 20 kg/h
- Räumliche Auflösung: 50 m

7.3 Quantifizierung der Emissionen von Bereichen

Ziel ist die Quantifizierung der Massenemissionsrate eines Bereichs.

Der zu kontrollierende Fläche ist üblicherweise $(50 \text{ m} \times 50 \text{ m})$ bis $(300 \text{ m} \times 300 \text{ m})$.

Das übliche DQO für die Bestimmung der Massenemissionsrate für den Bereich eines Standorts sollte sein:

- Erweiterte Unsicherheit: 40 % für den mittleren Massenemissionswert
- Nachweisgrenze: etwa 15 kg/h
- Räumliche Auflösung: 25 m

7.4 Quantifizierung der Emissionen von Anlagenteilen

Ziel ist die Quantifizierung der Massenemissionsrate eines Anlagenteils. Dies kann der Mittelwert der Emission aus verschiedenen Zeiträumen oder eine Zeitreihe von Emissionsraten zur Bestimmung der betriebsbedingten Emissionen, z. B. Emissionen eines Delayed Coker über dessen Betriebszyklus.

Die zu kontrollierende Fläche ist üblicherweise (10 m × 10 m) bis (50 m × 50 m).

Das übliche DQO für die Bestimmung der Massenemissionsrate eines Anlagenteils eines Standorts sollte sein:

- Erweiterte Unsicherheit: 40 % für den mittleren Massenemissionswert
- Nachweisgrenze: etwa 10 kg/h
- Räumliche Auflösung: 5 m – 10 m

7.5 Erkennung/Lokalisierung von Emissionsquellen

Die DQOs für die Lokalisierung beziehen sich auf die kleinsten zuverlässig durch die Technik nachweisbaren Emissionen.

- Kleinste nachweisbare Emission: 30 g/h
- Zeit zur Untersuchung einer Komponente: < 5 min
- Räumliche Auflösung: < 1 m

8 Übersicht über die Verfahren

8.1 Anwendbarkeit und Einschränkungen der Messtechniken

8.1.1 Anwendbarkeit

Tabelle 1 fasst zusammen, wie die in diesem Dokument festgelegten fünf Verfahren zur Erkennung, Lokalisierung und Quantifizierung beitragen können. Die Effizienz des Ansatzes wird durch die Größe und Komplexität des Standorts sowie der Art seiner bisherigen Emissionen bestimmt. Die Tabelle zeigt die übliche Anwendung der Verfahren. Dieses Dokument schließt die Anwendung der Verfahren für andere Zwecke nicht aus.

Schnüffelverfahren (und Korrelationskurven), Durchflussskammer-/Windtunnelmessungen und Bagging dürfen als zusätzliche Techniken für die Erkennung, Lokalisierung und Quantifizierung von Lecks verwendet werden. Diese Techniken werden in diesem Dokument aber nicht beschrieben.

Tabelle 1 —Anwendbarkeit der Messtechniken

Emis- sionstyp	Art der Emissions- quelle	Beispiele	Mittlere Größe (m × m)	Techniken zur Bestimmung der Emissionsquelle				
				Differential Absorption Lidar (DIAL)	Solar Occultation Flux (SOF)	Tracer-Korrelation (TC)	Optische Gasdetektion (OGI)	Inverse Ausbreitungsrechnung (RDM)
Fugitiv	Komponente	Pumpen, Ventile, Flansche, Armaturen, Dichtungen, Probe- nahmepunkte oder andere Teile eines Rohrleitungssystems	entfällt	-	-	-	D/L1	-
Anders diffus	Anlagenteil	Einzelner Lagertank, einzelnes Becken, Kompressor, API-Abscheider, Destillationsturm	50 × 50	D/Q/L2	D/Q/L2	D/Q/L2	D/L1	D/Q
		Fackel	entfällt	D/Q/L1	D/Q/L1	-	-	-
	Bereich	Gruppe von Lagertanks, Prozesseinheit	300 × 300	D/Q/L2	D/Q/L2	-	D/L1 ^a	D/Q
		Verlade-/Entlade- einrichtung	100 × 50	D/Q/L2	D/Q/L2	D/Q/L2	D/L1 ^a	D/Q
		Wasseraufberei- tungsanlage und andere Flächenquellen	100 × 100	D/Q/L2	D/Q/L2	D/Q	-	D/Q
	Standort	Industriestandort, vollständige Industrieeinheit, Lagereinrichtung	> 500 × > 500	D/Q/L2	D/Q/L2	-	D/L1 ^a	-
Legende D Erkennung der Emissionsquelle L1 genaue Lokalisierung der Emissionsquelle L2 ungefähre Lokalisierung der Emissionsquelle Q Quantifizierung der Durchflussrate der Emissionsquelle Fettgedruckt: Hauptanwendbarkeit der Techniken (siehe Einschränkungen) ^a Großflächige Bereiche (Abschnitt, Standort) werden durch die Analyse einzelner Komponenten und Anlagen behandelt.								

8.1.2 Einschränkungen

8.1.2.1 OGI

Die OGI-Visualisierung von VOC-Fahnen erfordert hohe VOC-Konzentrationen und einen geeigneten Hintergrund. Die Technik ist daher ideal für die genaue Bestimmung von Emissionsquellen, aber weniger geeignet für die Identifizierung stark verdünnter Fahnen. Daher können Quellen, die durch ihre Emission je Flächeneinheit charakterisiert werden und einer schnellen Ausbreitung unterliegen, wie etwa die Oberfläche eines Wasseraufbereitungsbeckens, gegebenenfalls nicht erkennbar sein, selbst wenn dieselben oder sehr viele kleinere Emissionen aus einer Punktquelle deutlich sichtbar wären. Gleichermassen breitet sich die kombinierte Fahne aus Quellen eines Bereichs oder Standorts im Allgemeinen aus und ist zu stark verdünnt, um mit OGI aus der Entfernung erkannt zu werden. Die Erkennung von Emissionen aus Anlagenteilen, Bereichen oder Standorten erfolgt deshalb durch die Untersuchung ihrer einzelnen Komponenten. Die Quantifizierung von Emissionen durch OGI wird in diesem Dokument nicht behandelt. Es ist jedoch möglich, qualitativ zu beurteilen, ob eine Quelle klein, mittel oder groß ist. Die Erkennung hängt grundsätzlich von der Fähigkeit ab, die Emissionsquelle im Sichtfeld aufzulösen.

8.1.2.2 DIAL

Die DIAL-Messung erfordert eine klare (zeitlich gemittelte) Abgrenzung zwischen einer dispergierenden Fahne und Hintergrundkonzentrationen, um den Querschnitt der Fahne, ihre Höhe über dem Boden und das Konzentrationsprofil erkennen zu können. Dies wird am besten in mäßigen Abständen zu Emissionsquellen erreicht, wo sich Fahnen zwar vermischt haben, aber noch nicht zu weit gegenüber Hintergrundkonzentrationen dispergiert sind. DIAL steuert die Ausrichtung des Scans bezüglich der Windrichtung und der Nähe zur Quelle. Die Bestandsaufnahme eines Standorts lässt sich am besten anhand diskreter Messungen der Emissionen aus Bereichen oder Anlagen machen, dargestellt als Zeitleiste, um die Dauer der Standortanalyse zu berücksichtigen und zu berücksichtigen, dass sich einige Emissionen je nach Arbeitsprozessen innerhalb dieser Zeit verändern können.

8.1.2.3 SOF

SOF-Messungen erfordern ein Messfahrzeug, das auf Straßen in Luv und Lee der untersuchten Emissionsquellen fährt und dabei eine klare Sichtlinie zur Sonne einhält. Eine SOF-Analyse ist somit in ihrer Möglichkeit, Emissionen aus Anlagen oder Bereichen zu trennen, durch die Lage der Straßen, die vorherrschende Windrichtung, die Bewölkung und den Grad der Überschattung der Straßen eingeschränkt. SOF bietet eher eine weglängenintegrierte als räumlich aufgelöste Messung und ist im Hinblick auf ihre Empfindlichkeit weniger von der Verdünnung der Fahne beeinflusst als andere Techniken. SOF profitiert von der Verringerung von Konzentrationsinhomogenitäten innerhalb der Fahne, die eine höhere Dispersion mit sich bringen kann. Einzelne Messungen während einer Messfahrt sind zeitlich diskret und nicht zeitlich mittelbar. Ensemble-Verfahren und statistische Analysen müssen zur Interpretation der Daten, die eine breite Variation aufweisen können, eingesetzt werden.

8.1.2.4 TC

Das TC-Verfahren stützt sich in erster Linie auf Messungen der bodennahen Konzentration aus einem fahrenden Fahrzeug heraus, wenn es im Detektions- und Tracer-Modus eingesetzt wird. Messpfade sind durch die Lage der Straßen und die vorherrschende Windrichtung eingeschränkt. Erhöhte Quellen werden gegebenenfalls nicht erkannt, wenn sie keine konsistente charakteristische Konzentration in Bodenhöhe liefern. Für das Tracing muss die Emissionsquelle lokalisiert und ein unterstützendes Verfahren wie OGI angewendet werden. Die Technik erfordert eine geeignete gemeinsame Position des Tracers und der Emissionsquelle. Die Bestimmung der Emissionsrate hängt davon ab, dass der Beitrag der windseitigen Quellen gering ist oder korrigiert werden kann.

8.1.2.5 RDM

Das RDM-Verfahren erfordert bodennahe Konzentrationen und wird mit Einzelmessungen von kurzer Dauer bei mobiler Probenahme durchgeführt. Es wendet ein mathematisches Ausbreitungsmodell zur Simulation einer Tracerfreisetzung an und mathematische Inversion zur Schätzung der Emissionsrate. Das Modell muss für den Anwendungszweck geeignet und validiert sein. Die Leistungsfähigkeit des Modells variiert je nach meteorologischen Bedingungen und die Qualität der Simulation der Bedingungen ist unterschiedlich. Wenn die Messungen in Bodennähe vorgenommen werden, sinkt die Qualität der Schätzung der Freisetzungsraten mit zunehmender Quellhöhe, da leicht vom Hintergrund zu unterscheidende Konzentrationen in Bodennähe entstehen müssen. Die Lage der modellierten Quelle muss bekannt sein und ein unterstützendes Verfahren wie OGI ist erforderlich. Ensemble-Verfahren und statistische Analysen werden zur Interpretation der Daten eingesetzt. Die Bestimmung der Emissionsrate hängt davon ab, dass der Beitrag der windseitigen Quellen gering ist oder korrigiert werden kann.

8.2 Messverfahren

8.2.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die verschiedenen Verfahren zur VOC-Erkennung. In einer die allgemeine Beschreibung ergänzenden Tabelle werden die Eigenschaften und das Leistungsvermögen des Verfahrens dargestellt. Diese können zur Beurteilung der Eignung der Verfahren für verschiedene Messziele verwendet werden. Die Mindestleistungsanforderungen müssen bei Anwendung des Verfahrens erfüllt werden, um sicherzustellen, dass ein Mindestmaß an Qualität für die jeweilige Messaufgabe erreicht wird. Die hier beschriebenen Verfahren liefern keine kontinuierlichen Emissionsdaten, sondern ermöglichen die Quantifizierung von VOC-Emissionen über begrenzte Zeiträume.

Ausführliche Verfahrensanweisungen sind in Anhang A, Anhang B, Anhang C, Anhang d und Anhang E enthalten.

8.2.2 Differential Absorption Lidar (DIAL)

DIAL arbeitet mit Laserquellen im Infrarot- und UV-Spektralbereich zur Erkennung und Quantifizierung von Emissionen der festgelegten VOCs [12; 13; 14]. DIAL sendet Laserlichtimpulse in die Atmosphäre, um Konzentration und Ort eines Zielgases (in diesem Fall VOCs) in der Atmosphäre zu bestimmen. Diese Technik kann räumliche Konzentrationen über einen Bereich bis typischerweise 500 m bis 800 m mit einer räumlichen Auflösung von etwa 10 m bestimmen. Durch die Kombination der Konzentrationen mit Winddaten können Emissionsraten ermittelt werden. Ein DIAL-System wird üblicherweise auf einer mobilen Plattform installiert und kann unter den meisten Umgebungsbedingungen betrieben werden, da es ein aktives System ist. Es wird hauptsächlich zur Erkennung und Quantifizierung von Emissionen aus getrennten Bereichen eines Industriestandorts eingesetzt, wobei einer oder mehrere Bereiche gleichzeitig gemessen und die Ergebnisse zur Emission des gesamten Standorts kombiniert werden. Die räumlich abgebildete Information ermöglicht die Lokalisierung von Emissionen innerhalb gemessener Bereiche und die Unterscheidung von Emissionen aus anderen Bereichen des Standorts. Die Technik ist auf ein oder zwei Spezies gleichzeitig ausgerichtet und üblicherweise nicht empfindlich gegenüber Emissionen, die bereits über eine große Entfernung dispergiert wurden. DIAL liefert Kartierungs- und Quantifizierungsdaten von Standortebene bis hin zu einzelnen Emissionsquellen. Tabelle 2 fasst Eigenschaften und Leistungsvermögen des DIAL-Verfahrens zusammen.

Tabelle 2 — DIAL-Verfahren: Eigenschaften und Leistungsvermögen

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Informationen	Größe	Maximaler Arbeitsbereich zwischen 500 m und 800 m. Messobjekt ist typischerweise ein spezifischer Bereich eines Industriestandorts mit einer Länge zwischen 100 m und 300 m.
	Auflösung	Räumliche Informationen in 2 Dimensionen innerhalb der Messebene; bestimmt durch das eingesetzte Verfahren Signalmittelung, das von atmosphärischen Bedingungen und der Konzentration des gemessenen Schadstoffs abhängig ist, und im Bereich von 10 m liegt.
Arten von Quellen	Zugängliche Quellen	Ja.
	Nicht zugängliche Quellen	Ja.
	Einheiten	Ja.
	Anlagen	Ja, Möglichkeit, Emissionsquellen räumlich zu trennen und Komponenten wie Entlüftungen und Fackeln einzeln zu messen.
	Komponenten	Nein.
	Lagertanks	Ja, Fest- und Schwimmdächer.
Zusammenfassung	Beschreibung der Hauptfunktion der Technik, z. B. Emissionserkennung, Bestimmung der Emissionsrate	3D-Abbildung von Emissionskonzentrationen und die Quantifizierung von Emissionsraten für eine Vielzahl von Zielgasen. Bereichsaufgelöste Fernmessungen zur Messung bereichsspezifischer Emissionen und deren Summierung zur Emission des gesamten Standorts, ohne die üblichen betrieblichen Aktivitäten zu unterbrechen.
Funktion	Erkennung und/oder Quantifizierung und Lokalisierung von Emissionsquellen	Erkennung und Quantifizierung von bereichsspezifischen und Emissionen und der Emission des gesamten Standorts. Lokalisierung der Quellen.
Ausgabe	Ergebnisse für den Messbericht (einschließlich Einheiten)	Emissionsrate in kg/h und 2D-Konzentrationsabbildung in ppm.
Messgrundlage	Berechnung oder Messung	Messung der 2D-bereichsaufgelösten Gaskonzentration, kombiniert mit dem gemessenen vertikalen Windprofil zur Ermittlung der Emissionsrate der Quellen.
Gemessene Parameter	Direkt gemessen	Bereichsaufgelöste Gaskonzentration, Windrichtung und Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen.
Ergänzende Daten	Weitere erforderliche Informationen	GPS-Daten des DIAL-Standorts, DIAL-Ausrichtung und Scanwinkel. Luftproben zur Ermittlung der tatsächlichen Speziation der mit DIAL gemessenen VOC-Emissionen.
Gemessene Verbindungen	Spezies	Vielzahl von VOC-Verbindungen, z. B. Benzol und Toluol im UV-Bereich und VOCs im IR-Bereich (C-H-Streckschwingung Kohlenwasserstoffen mit 3 und mehr C-Atomen).
	Einzelne oder mehrere Verbindungen	Ein oder zwei Spezies gleichzeitig.

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Ortsbezogene Information	Genauigkeit der Lage der Emissionsquellen (in Bezug auf die Größe)	Genauie Lokalisierung von Emissionen aus bestimmten isolierten Quellen wie Fackeln und Ventilen. Bei kompakte Einheiten mit mehreren Anlagenteilen Trennung und Lokalisierung von verschiedenen Quellen innerhalb der DIAL-Auflösung, typischerweise 10 m bis 30 m.
Nachweisgrenzen (Emissionsrate und/oder Konzentration)	In Ausgabeeinheiten	Typisches Signal-Rausch-Verhältnis der Laser-Rückstreuung von 500 Ergebnissen bei einer Nachweisgrenze für Konzentrationen von besser als 30 ppb im Infrarot- und 10 ppb im Ultraviolettbereich für eine Fahne mit einer Ausdehnung von etwa 50 m. Für Windgeschwindigkeiten von wenigen m/s entspricht dies einer Nachweisgrenze von etwa 0,1 kg/h im Ultraviolett- und 0,3 kg/h im Infrarotbereich. Die tatsächliche Empfindlichkeit variiert mit den atmosphärischen Bedingungen, der Windgeschwindigkeit, den Dimensionen der Fahne und dem Abstand zum DIAL.
Typischer Bereich		Maximaler Arbeitsbereich zwischen 500 m und 800 m. Typischerweise Messung einer spezifischen Einheit eines Industriestandorts mit einer Länge zwischen 100 m und 300 m.
Zeitliche Auflösung/Messfrequenz		Erzielen eines vertikalen DIAL-Scan mit einem akzeptablen Signal-Rausch-Verhältnis zwischen 10 min und 20 min. Die wesentlichen Unsicherheitsquellen verhalten sich zufällige, sodass die Standardabweichung eines Satzes von mindestens 4 DIAL-Scans repräsentativ für die Messunsicherheit ist.
Typische Unsicherheit der Emissionsrate		Eine DIAL-Messung mit einem Satz von mindestens 4 DIAL-Scans einzelner Quellen, Anlagen und Bereichen hat eine erweiterte Unsicherheit von 5 % bis 25 %.

8.2.3 Solar Occultation Flux (SOF)

Mit dem SOF-Verfahren werden Gasemissionen von kompletten Standorten bis hin zu einzelnen Anlagenteilen abgebildet und quantifiziert [15; 16; 17]. Mit dem Verfahren können große Bereiche des Standorts untersucht und signifikante Quellen identifiziert werden. Die SOF-Technik benötigt direktes Sonnenlicht, das über einen breiten Spektralbereich zur Erkennung und Quantifizierung von Emissionen der festgelegten VOCs eingesetzt wird. Mit FTIR-Spektrometrie wird das die Atmosphäre passierende und von einem mobilen System detektierte Sonnenlicht analysiert. Im Lee der VOC-Quellen wird in dem fahrenden Messfahrzeug ein integriertes Konzentrationsprofil aufgenommen. Üblicherweise werden die Messungen beim Umfahren der Emissionsquellen durchgeführt. Damit können die Luv-Komponenten von den Lee-Komponenten subtrahiert werden, nachdem die entsprechenden pfadintegrierten Konzentrationen mit Windinformationen kombiniert wurden, um die Emissionsraten zu bestimmen. Tabelle 3 fasst Eigenschaften und Leistungsvermögen des SOF-Verfahrens zusammen.

Tabelle 3 — SOF-Verfahren: Eigenschaften und Leistungsvermögen

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Informationen	Größe	Von der Größe mehrerer vollständiger Standorte bis hin zu Bereichen eines Standorts oder isolierten Anlagenteilen (mind. 10 m).
	Auflösung	Räumliche Konzentrationsinformationen in einer Dimension entlang des Messpfads. 5 m bis 25 m in der Horizontalen, je nach Fahrgeschwindigkeit bei den Messungen.
Arten von Quellen	Zugängliche Quellen	Ja
	Nicht zugängliche Quellen	Ja
	Bereiche	Ja
	Anlagenteile	Ja, Möglichkeit, Emissionen aus einzelnen Einrichtungen wie Lagertanks, Entlüftungen und Fackeln zu quantifizieren, wenn sie räumlich getrennt sind.
	Komponenten	Nein
Zusammenfassung	Beschreibung der Hauptfunktion der Technik, z. B. Emissionserkennung, Bestimmung der Emissionsrate	Das Verfahren wird zur Darstellung zweidimensionaler Konzentrationssäulen für die Emissionssuche und Quantifizierung von Gasemissionen von Industriekomplexen bis hin zu isolierten Anlagenteilen verwendet. Eine Vielzahl von Zielgasen kann gemessen werden. Messungen werden von außerhalb als auch innerhalb der Industrieanlagen ohne Unterbrechung der üblichen betrieblichen Aktivitäten durchgeführt.
Funktion	Erkennung und/oder Quantifizierung und Lokalisierung von Emissionsquellen	Erkennung und Quantifizierung von Punktquellen und diffusen bereichsspezifischen Emissionen sowie Gesamtemissionen des Standorts. Lokalisierung der Quellen.
Ausgabe	Ergebnisse für den Messbericht (einschließlich Einheiten)	Emissionsrate (kg/h) und geolokalisierte (Breitengrad/Längengrad) vertikale Säulen (mg/m ²).
Messgrundlage	Berechnung oder Messung	Messung schräger Gassäulen in Kombination mit der mittleren Geschwindigkeit der Fahne und Positionsdaten zur Ermittlung der Emissionsrate der Quellen.
Gemessene Parameter	Direkt Messung	Messungen schräger Säulen (mg/m ²) sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.
Ergänzende Daten	Andere erforderliche Informationen	Geolokalisierung des Messfahrzeugs (Breitengrad/Längengrad). Lokale Windrichtung (Grad N) und Windgeschwindigkeit (m/s). Optional, Massenverhältnis zusätzlicher Gase (mg/m ³) zu den gesamten Alkanen (mg/m ³) zur indirekten Emissionsmessungen ergänzender Gasarten.
Gemessene Verbindungen	Arten (einzelne oder mehrere)	Gleichzeitige Messung einer Vielzahl unterschiedlicher VOC-Verbindungen einschließlich Alkane (C ₂ -C ₂₀), Alkohole (C ₁ -C ₈), Alkene (C ₂ -C ₄), Amine, Diene, Aldehyde und Vinylchlorid.

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Auflösung	Genauigkeit der Lage der Emissionsquellen (in Bezug auf die Größe)	Lokalisierung der Emission einer isolierten Quelle selbst bei vorhandenen Hintergrundquellen, solange die Quelle dominiert und umfahren werden kann. Trennung und Lokalisierung verschiedener Quellen bei kompakten und komplexe Anlagen durch Messungen in verschiedenen Windrichtungen und der Zusammensetzung der Fahne, typischerweise mit einer Auflösung zwischen 20 m und 50 m; abhängig von der Möglichkeit der Umfahrung, der Quellstärke, den Hintergrundemissionen und der Quellenart.
Nachweisgrenzen (Emissionsrate und/oder Konzentration)	In Ausgabeeinheiten	Nachweisgrenzwert einer üblichen SOF-Messung etwa 1 kg/h für Nahfeldmessungen an einem isolierten Anlagenteil. Tatsächliche Empfindlichkeit veränderlich je nach Verbindung, Windgeschwindigkeit, Fahndispersion und Abstand zur Quelle. Typische Nachweisgrenze für schräge Säulen: 1 – 5 mg/m ² , je nach Spezies.
Typischer Bereich		Emissionsrate: 1 kg/h bis zu mehreren Tonnen je Stunde (keine definierte Obergrenze). Schräg Säule: 1 mg/m ² bis etwa 2 000 mg/m ² .
Zeitauflösung/ Messfrequenz		Messfrequenz bei Säulenmessungen: 1 s – 5 s. Zeitauflösung einer kompletten Emissionsmessung zwischen 10 min und 1 h je nach physischer Größe der Quelle, wiederholt über 3 Tage.
Typische erweiterte Unsicherheit der Emissionsrate		20 % bis 40 %

8.2.4 Tracer-Korrelation (TC)

Das TC-Verfahren wird zur zweidimensionalen Abbildung von Konzentrationen und zum Aufspüren von Emissionen auf einem Industriestandort sowie zur Quantifizierung von Gasemissionen aus einzelnen Komponenten, Anlagenteilen (z. B. Tanks) und, in einigen Fällen, aus Bereichen eines Standorts, sofern diese räumlich getrennt sind, eingesetzt [18; 19; 20]. TC basiert auf der kontrollierten Freisetzung einer bekannten Rate eines Tracergases wie etwa C₂H₂ oder N₂O. Die Konzentration des Tracergases wird bei gleichzeitiger Messung der Quellengaskonzentration mit einem mobilen Messgerät in Windrichtung gemessen. Die Emissionsrate des Quellengases kann aus der bekannten Freisetzungsrates des Tracergases (kg/h) und der gemessenen Massenkonzentration (mg/m³) sowohl des Tracer- als auch des Quellengases in der Emissionsfahne ermittelt werden. Diese Technik basiert auf der Annahme, dass das Tracergas der gleichen Dispersion und dem gleichen Transport in der Atmosphäre unterliegt wie die Quellengasemissionen. Die Tracertechnik wird üblicherweise angewendet, um Emissionen aus bekannten oder vermuteten Quellen (Quellenbereichen) oder einzeln für jede Quelle zu quantifizieren. Tabelle 4 fasst Eigenschaften und Leistungsvermögen des TC-Verfahrens zusammen.

Tabelle 4 — TC-Verfahren: Eigenschaften und Leistungsvermögen

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Informationen	Größe Auflösung	Maximaler Arbeitsbereich zwischen 10 m und 2 km. Räumliche Konzentrationswerte in einer Dimension entlang des Messpfads. 5 m bis 25 m in der Horizontalen, je nach Fahrgeschwindigkeit während der Messungen.
Arten von Quellen	Zugängliche Quellen Nicht zugängliche Quellen Einheiten Anlagenteile Komponenten	Ja Ja, wenn das Tracergas an der Quelle positioniert werden kann. Ja Ja Ja, wenn sie räumlich getrennt sind.
Zusammenfassung	Beschreibung der Hauptfunktion der Technik, z. B. Emissionserkennung, Bestimmung der Emissionsrate	Das Verfahren wird zur zweidimensionalen Abbildung von Konzentrationen in Bodennähe und zum Aufspüren von Emissionen auf einem Industriestandort sowie zur Quantifizierung von Gasemissionen aus einzelnen Komponenten, Anlagenteilen (z. B. Tanks) und, in einigen Fällen, kleinen Bereichen eines Standorts, sofern diese isoliert oder räumlich getrennt sind, eingesetzt. Letztere beinhalten Wasserbehandlungsbereiche und kleinere Prozesseinheiten sowie Bodenfackeln. Eine Vielzahl unterschiedlicher Quellengase kann gemessen werden. Die Konzentrationsmessungen werden sowohl von außerhalb und innerhalb der Industrieanlagen ohne Unterbrechung der üblichen betrieblichen Aktivitäten durchgeführt. Die Quantifizierung mit Tracergas erfordert einen Zugang zu dem Emissionspunkt/-ort.
Funktion	Erkennung und/oder Quantifizierung und Lokalisierung von Emissionsquellen	Erkennung und Quantifizierung spezifischer Emissionen aus Komponenten und kleineren Prozesseinheiten. Lokalisierung der Quellen.
Ausgabe	Ergebnisse für den Messbericht (einschließlich Einheiten)	Emissionsrate in kg/h und Konzentrationen in Abhängigkeit von der Position (Breite/Länge) in µg/m³.
Messgrundlage	Berechnung oder Messung	Messung von Gaskonzentrationsdaten aus Quellengas und Tracergas.
Gemessene Parameter	Direkte Messung	Lokale Konzentration von Tracergas und Quellengas in µg/m³ am Einlass der Probenahmeeinrichtung und freigesetzte Tracergasmenge.
Ergänzende Daten	Andere erforderliche Informationen	Geolokalisierung des Fahrzeugs (Breite/Länge). Windrichtung (Grad N) für die Konzentrationsabbildung (Quellenlokalisierung). Winddaten werden nicht benötigt.

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Gemessene Verbindungen	Spezies (einzelne oder mehrere)	Mobile Sensoren oder die Kombination mehrerer Sensoren, der/die die Quellen- und Tracergase mit der erforderlichen Empfindlichkeit (< 10 ppb) und Zeitauflösung (10 s) misst, können verwendet werden. Eine geeignete in Feldvalidierungsexperimenten verwendete Technik ist die Lichtabsorptionsmessung im Infrarot- und UV-Bereich, die gleichzeitig eine Vielzahl verschiedener VOC-Verbindungen einschließlich Methan, andere Alkane (C_2 - C_{20}), Alkohole (C_2OH - C_8OH), Alkene (C_2 - C_4), Amine, Diene, Aldehyde, Vinylchlorid und aromatische VOC detektieren kann. Darüber hinaus können N_2O und Acetylen gemessen werden, die geeignete Tracergase sind.
Räumliche Auflösung	Genauigkeit der Lage der Emissionsquellen (Bezug zur Größe)	Abhängig davon, wie nahe der Zugang zur Quelle der Fahne möglich ist. Die typische Auflösung beträgt 10 m – 25 m.
Nachweisgrenzen (Emissionsrate und/oder Konzentration)	In Ausgabeeinheiten	Variiert zwischen 0,1 und 1 kg/h für eine isolierte Quelle, je nach Verbindung, Windgeschwindigkeit, Fahnenausbreitung und Abstand zur Quelle. Anforderung an die Nachweisgrenze: $< 20 \mu g/m^3$ für das Quellengas und $< 10 \mu g/m^3$ für das Tracergas.
Typischer Bereich (Emissionsrate und/oder Konzentration)		Emissionsrate: 0,1 kg/h bis zu mehreren Tonnen je Stunde (keine festgelegte Obergrenze) Konzentration: 1 – 1 000 $\mu g/m^3$
Zeitauflösung/ Messfrequenz		Messfrequenz bei Konzentrationsmessungen: 1 s – 10 s Die Zeitauflösung für einen kompletten Fahnen transekt hängt von der Größe der Quelle ab. Eine tatsächliche Messung besteht aus mindestens 4 Fahnen transekten an 3 verschiedenen Standorten, die gemittelt werden. Punktquellen: 1 min – 5 min, diffuse Quellen: 10 min – 20 min
Typische erweiterte Unsicherheit der Emissionsrate		20 % bis 40 %

8.2.5 Optische Gasdetektion (OGI)

OGI verwendet eine Infrarot-Wärmebildkamera mit optischem Filter, der empfindlich für IR-Absorption bei bestimmten VOC ist. Die Kamera ermöglicht die Visualisierung von VOCs, die als Dampfwolken auf dem Bildschirm erscheinen. Das OGI-Verfahren kann in einem LDAR-Programm zur schnellen Untersuchung von Komponenten eingesetzt werden. OGI wird außerdem eingesetzt, um die Position von Lecks/Emissionen zu visualisieren und zu identifizieren und auch, um detailliertere Informationen zur Lage von Emissionsquellen von durch DIAL und SOF quantifizierte Emissionen zu liefern. Die Quantifizierung der Emissionsraten von Lecks und/Emissionen ist nicht möglich. Mit OGI können die Quellen von mit DIAL oder SOF identifizierten

Lecks/Emissionen lokalisiert werden. Tabelle 5 fasst Eigenschaften und Leistungsvermögen des OGI-Verfahrens zusammen.

Tabelle 5 — OGI-Verfahren: Eigenschaften und Leistungsvermögen

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Arten von Quellen		Lokalisierung bestimmter Emissionsquellen: — Zugängliche und unzugängliche Komponenten; — Geräte (Pumpen, Ventile, Flansche, Leitungsenden, Verschlüsse usw.) und einige andere unregelmäßige Emissionsquellen — Lagertanks (Fest- und Schwimmdächer).
Funktion		Erkennung und Lokalisierung von bestimmten Kohlenwasserstofflecks/-emissionen durch Visualisierung auf einem Videobildschirm. Präventive Wartung von Flüssigkeitskreisläufen: Pumpen, Ventile, Flansche, Leitungsenden, Verschlüsse usw. Validierung von Reparaturen an fehlerhaften Komponenten durch direkte Inspektion der Wirksamkeit der genannten Arbeit. Teil eines LDAR-Programms (Leckererkennung und Instandsetzung) zur Visualisierung von diffusen VOC-Emissionen von Lagertanks, von Verladearbeiten, von nicht in der Leistungsbeschreibung (SOW, en: Statement Of Work) eines LDAR-Programms enthaltenen Quellen oder für eine qualitative Inspektion nach einem Turnaround.
Erkennung und/oder Quantifizierung von Emissionsquellen, Lokalisierung		Optische Bildgebung, Betrachtung. Nur Erkennung, keine Quantifizierung. ^a
Berechnung und/oder Messung		Mögliche Emissionsschätzung an Komponenten anhand von Korrelationsfaktoren. Dieser Ansatz wird in diesem Dokument nicht behandelt.
Gemessene Parameter		Fahnenvisualisierung
Ergänzende Daten		Windgeschwindigkeit

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Ermittelte Verbindungen (Spezies)		Einige VOCs unter bestimmten Bedingungen (die Liste der nicht erkennbaren Produkte und Mischungen muss noch erstellt werden). Das Gerät reagiert nicht bei jeder Verbindung auf dieselbe Weise (je nach dessen optischen Absorptionseigenschaften im Infrarotbereich) und der Responsefaktor kann um einen Faktor 10 oder mehr zwischen einzelnen Verbindungen schwanken. Die Nachweisgrenze für leichte aromatische Verbindungen ist beispielsweise höher als für Alkane. Mischungen werden mit einer zur Massenkonzentration der einzelnen Komponenten proportionalen Empfindlichkeit detektiert.
Genauigkeit der Lage der Emissionsquellen (Bezug zur Größe)		Genaue Lokalisierung bestimmter Emissionsquellen, bei kleinen Lecks (nahe an der Nachweisgrenze) können jedoch mehrere Sichtwinkel erforderlich sein, um einen geeigneten Hintergrund zu finden, vor dem die Quelle visualisiert werden kann.
Nachweisgrenzen (Emissionsrate und/oder Konzentration)		Die Nachweisgrenze hängt von der Art der zu erkennenden Substanz(en) ab. Bei aliphatischen Kohlenwasserstoffen und Benzol liegt die untere Nachweisgrenze der Emission typischerweise im Bereich zwischen 1 g/h und 10 g/h [21; 22].
Zeitauflösung/ Messfrequenz	Produktionseinheit Bereich Lagertank Anlagenteil Komponentengruppe	Zwischen 1 d und 5 d Zwischen 0,25 d und 1 d Etwa 1 h Etwa 30 min Einige Minuten Ein Team aus zwei Personen kann grundsätzlich 1 500 bis 2 000 Bauteile je Tag untersuchen [21].
^a Quantitative OGI wird in diesem Dokument nicht behandelt.		

8.2.6 Inverse Ausbreitungsrechnung (RDM)

Methoden der Ausbreitungsmodellierung werden häufig eingesetzt und validiert, um die Ausbreitung von Schadstofffahnen zu simulieren. Bei der inversen Ausbreitungsrechnung werden diese Methoden verwendet, um die um eine Emissionsquelle herum gemessenen Konzentrationen mit simulierten Konzentrationen zu vergleichen. Der erste Schritt ist eine direkte Ausbreitungsrechnung mit einer theoretischen Emission. Der zweite Schritt besteht in der Schätzung der „realen“ Emission durch Anpassung der Quellstärke, bis simulierte und gemessene Konzentrationen übereinstimmen. Eine Beschreibung der auf die Staubbemessung angewendeten Methodik kann bestehenden Normen entnommen werden (z. B. EN 15445 [23]). Dieser Ansatz ist für jede Art von Schadstoff geeignet, wenn die Konzentration des Schadstoffs in der Atmosphäre gemessen wird. Tabelle 6 fasst Eigenschaften und Leistungsvermögen des RDM-Verfahrens zusammen.

Tabelle 6 — RDM-Verfahren: Eigenschaften und Leistungsvermögen

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Auflösung	Größe Auflösung	Keine Beschränkung, da der Ansatz auf einer Mehrpunktmessung während einer Begehung basiert . Jeder Messpunkt wird auf enger lokaler Ebene gemessen.
Arten von Quellen	Zugängliche Quellen Nicht zugängliche Quellen Einheiten Anlagenteile Komponenten Lagertanks	Ja. Unter bestimmten Umständen, wenn sich die Messpunkte in Bodenhöhe befinden. Ja. Ja, Möglichkeit, Emissionsquellen räumlich zu trennen und Bestandteile einzeln zu messen. Nein. Unter bestimmten Umständen, wenn sich die Messpunkte in Bodenhöhe befinden.
Zusammenfassung	Beschreibung der Hauptfunktion der Technik, z. B. Emissionserkennung, Bestimmung der Emissionsrate	Konzentrationspunkte entlang eines Pfads um Emissionsquellen Quantifizierung der Emissionsraten für eine Vielzahl von Zielgasen (entsprechend dem verwendeten Messgerät). Die Messstrategie ermöglicht Konzentrationsinformationen für mehrere Punkten der Fahne und ein Dispersionsmodell modelliert die vollständige Fahne zur Berechnung der Emissionsrate mit einem inversen Modell.
Funktion	Erkennung und/oder Quantifizierung und Lokalisierung von Emissionsquellen	Erkennung und Quantifizierung von Emissionen.
Ausgabe	Ergebnisse für den Messbericht (einschließlich Einheiten)	Emissionsrate in kg/h und Konzentration entlang des Pfads in mg/m ³ .
Messgrundlage	Berechnung oder Messung	Eine Reihe von Gaskonzentrationsmessungen kombiniert mit einem atmosphärischen, für den spezifischen Fall validierten Dispersionsmodell, zur Ermittlung der Emissionsrate der Quellen.
Gemessene Parameter	Direkte Messung	Gaskonzentration, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und atmosphärische Turbulenz und/oder Sonneneinstrahlung.
Ergänzende Daten	Andere erforderliche Informationen	GPS-Werte für den Standort (x, y, z, t) Eingabedaten für Strömungsfeld und Ausbreitungsmodell Prozessinformationen
Gemessene Verbindungen	Arten Einzelne oder mehrere Verbindungen	Je nach Analysegerät Summe der VOC mit FID, ionisierte VOC mit PID, Alkane/Alkene mit FTIR, Benzol mit DOAS Nicht spezifisch für VOC mit FID / PID / IR. Möglicherweise mit UV (Benzol)

Eigenschaft	Details	Anmerkungen / Erläuterung
Räumliche Auflösung	Genauigkeit der Lage der Emissionsquellen (Bezug zur Größe)	Messungen entlang eines Pfads zur genauen Lokalisierung der Emissionsquelle (1 m).
Nachweisgrenzen (Emissionsrate und/oder Konzentration)	In Ausgabeeinheiten	Abhängig von Empfindlichkeit des Analysegeräts: ungefähr 1 kg/h bei Verwendung eines FID, 0,1 kg/h bei Verwendung der UV/IR-Messverfahren. Die tatsächliche Empfindlichkeit variiert je nach atmosphärischen Bedingungen, Windgeschwindigkeit und atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen.
Zeitauflösung/ Messfrequenz		Zwischen 30 min und 60 min mit FID / PID

9 Meteorologische Daten und Messungen

Dies ist eine Zusammenfassung der im Einzelnen in Anhang F behandelten Punkte.

Die beschriebenen quantitativen Techniken verwenden meteorologische Daten, um Emissionsraten aus Konzentrationsmessungen zu berechnen und die Beiträge der Quellen anhand von Messstandort und Windrichtung zu trennen. Die Techniken haben individuelle Grenzen bezüglich geeigneter Windgeschwindigkeiten. Grundsätzlich wird angenommen, dass Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Messungen konstant sind. Auch nachträgliche Interpretationen von Emissions- und Konzentrationsdaten werden auf die im Zeitraum vor und während der Messungen aufgezeichneten Winddaten Bezug nehmen.

Meteorologischer Standard für die Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung sind entsprechende Messungen in einer Höhe von 10 m über glattem ebenen Boden. Die Instrumente werden üblicherweise an einem Mast montiert. Der Mast sollte sich in einem offenen Bereich befinden, um Störungen der Luftströmung durch windseitige Strukturen zu vermeiden. Da offene Räume an Industriestandorten selten zu finden sind, wurde eine praktische Anleitung zur Berücksichtigung dieser Strukturen entwickelt, die in Anhang F angegeben ist. Der Anhang enthält auch Leistungsanforderungen für Windmessungen.

Ein Prozessindustriestandort oder ein Verteilerterminal stellen die Windmessung vor besondere Probleme. Die hohe Anzahl, Größe und Nähe von Strukturen blockiert den Wind erheblich. Ihre typische Anordnung auf einem Netz bedeutet, dass die Strömung durch den Standort bei sich ändernder Hintergrund-Windrichtung lokal eine erheblich von den an einer Referenzstation gemessenen Werten abweichende Windrichtung und -geschwindigkeit haben kann. Diese lokalen Abweichungen müssen berücksichtigt werden, wenn sie mit den für die Berechnungen zu verwendenden Konzentrationsmessungen zusammenfallen.

Dieses Dokument legt fest, dass

- mindestens eine meteorologische Referenzstation für die Dauer der Messkampagne eingerichtet wird;
- Messgeräte angemessen zertifiziert und geprüft sein müssen;
- Kriterien für zulässige Windbedingungen bei den Messungen angewendet werden. Diese betreffen den Bereich der Windgeschwindigkeit und die Stabilität der Windrichtung für jedes Messintervall.

Dieses Dokument empfiehlt, dass

- der Standort des Referenzmasts der Anleitung zur Berücksichtigung windseitiger Strukturen entspricht;

- bei einer vorherrschenden Windrichtung ein Referenzmast an der Windseite des Standorts aufgestellt werden sollte.

Es sollte nicht angenommen werden, dass Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Referenzmast diese Parameter auch am Ort der Konzentrationsmessung repräsentieren. Anordnung und Nähe von Strukturen sollten auf ihre potenzielle Auswirkung auf diese Parameter geprüft werden. Lokale Windmessungen dürfen zur Überprüfung von deren Änderungen verwendet werden. Mehrere meteorologische Referenzstationen dürfen eingerichtet werden, um z. B. mehrere windseitige Richtungen zu erfassen. Die Analyse der Unterschiede von Windgeschwindigkeit und -richtung zwischen Referenzstationen können Informationen über die gesamte Veränderung der Strömung am Standort liefern. Diese Unterschiede können groß sein.

Zur Beurteilung der potenziellen Auswirkung ist zu berücksichtigen, dass der Wind grundsätzlich um und nicht über einzelne Strukturen strömt. Der Wind folgt klaren Sichtlinien durch Gruppen von Strukturen, die schräg zur Referenz-Windrichtung stehen, möglicherweise mit Steigerung seiner Geschwindigkeit. Wenn keine klare Sichtlinie besteht, passiert der Wind die Gruppe, was zu Regionen mit niedriger und hoher Windgeschwindigkeit und variablen Windrichtungen bis hin zur Strömungsumkehr führt. Die Anleitung für die Positionierung des Masts in Anhang F nennt die Größe dieser Regionen. Lokale Windmessungen z. B. mit einem tragbaren Anemometer können diese Schätzungen verfeinern.

Unsicherheiten der Windgeschwindigkeit und -richtung sollten bei den Berechnungen der Emissionsraten berücksichtigt werden.

Winddaten sollten zeitlich gemittelt sein, um höherfrequente turbulente Schwankungen zu glätten und die Konsistenz mit den Annahmen für die Emissionsratenberechnungen herzustellen. Diese erfordern eine definierte Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Eine Mittelungszeit von 10 min ist im Allgemeinen ausreichend. Die Variabilität der Windrichtung sollte beurteilt werden. Eine hohe Variabilität ist mit geringen Windgeschwindigkeiten verbunden. Variabilität kann eine signifikante Änderung der Windrichtung über die Mittelungszeit verbergen. Für lokale Messungen kann sie auf eine gestörte Strömung hindeuten.

Die Windpersistenz P ist ein leicht zu berechnender Parameter, der die Variabilität der Windrichtung angibt. Dieser Wert ist definiert als das Verhältnis der Windgeschwindigkeit in der Windrichtung zu der absoluten Windgeschwindigkeit. Bei konstanter Windrichtung ist $P = 1$.

Zur Orientierung schlägt dieses Dokument (Mittelwerte über 10 min) vor:

- $0,95 < P \leq 1$ weist auf stetigen Wind hin;
- $0,9 < P \leq 0,95$ weist darauf hin, dass der Wind stetig sein kann, aber die Winddaten überprüft werden sollten;
- $P \leq 0,9$ weist darauf hin, dass der Wind wahrscheinlich unstetig ist oder eine Änderung der Windrichtung stattgefunden hat; die Winddaten sollten überprüft werden.

Überprüfung der Winddaten heißt Untersuchung der Zeitreihen von Windgeschwindigkeit und -richtung, um festzustellen, ob die Bedingungen stetig oder veränderlich waren. Dies kann anhand der geglätteten Daten erkennbar sein oder eine Untersuchung höherfrequenter Daten erfordern.

Die Berechnung von P anhand der Ausgabe eines üblichen Datenloggers wird in Anhang F beschrieben.

Vertikale Profile von Windgeschwindigkeit und -richtung fließen in die Berechnung der Emissionsrate ein. Falls keine generischen Daten vorhanden sind, sollten atmosphärische Standardwindprofile nach Anhang F verwendet werden. Die Profile können durch Referenzmastmessungen in mehreren Höhen kalibriert werden. Mit Wind-LIDAR dürfen vertikale Profile von Windgeschwindigkeit und -richtung ermittelt werden. Die Ergebnisse sollten über z. B. 10 min in gleicher Weise wie Oberflächendaten gemittelt werden. Ballons können bei sachgemäßer Diskussion der Ergebnisse verwendet werden. Dieses Dokument fordert keine

Messung der atmosphärischen Stabilität, die Bestimmung einer *Obukhov*-Länge ermöglicht jedoch die Verfeinerung des vertikalen Standardwindprofils.

10 Messstrategie und Planung von Messkampagnen

10.1 Allgemeines

Auf der Grundlage der in Abschnitt 6 festgelegten und beschriebenen Messziele sollte eine ausführliche Planung der Messkampagne durchgeführt werden.

Die Bestandsaufnahme der Standortemissionen kann eine Orientierungshilfe für potenzielle Emissionsquellen und eine Schätzung der Emissionen, auf die die Messungen bezogen werden können, liefern.

10.2 Messziele

Folgendes muss festgelegt werden:

- Zweck der Messungen;
- zu prüfende Gebiete und/oder Anlagen (Standort, Bereiche, Anlagenteile, Komponenten);
- erforderliche Ausgabedaten, z. B. 2D-Konzentrationskarten, Emissionsraten, Konzentrationswerte, Fahneigenschaften, Emissionsorte, Emissionsquantifizierung;
- Prozess- und Betriebsbedingungen, die für die Emission und das Messverfahren relevant sind;
- zu messende VOCs (z. B. ob bestimmte Spezies einzeln zu messen sind);
- Zeitraum der Messkampagne;
- Datenqualitätsanforderungen, z. B. Datenerfassung, Überdeckung, zeitvariante Messanforderungen wie etwa Messungen während eines Prozesszyklus.

Das Messziel kann auch die anzuwendenden Messverfahren und die Anforderungen an die Messunsicherheit festlegen.

Alle anlagenspezifischen Informationen, die für die Messaufgabe und das angewendete Messverfahren relevant sind, müssen festgelegt und der Weg ihrer Bereitstellung bestimmt werden.

Je nach Komplexität der Messung kann eine Standortbegehung im Vorfeld erforderlich sein, um die erforderlichen Informationen auszutauschen.

Je nach verwendeter Technik sollten folgende Punkte mit den Standortverantwortlichen besprochen werden:

- a) relevante Dokumente wie etwa Verträge, Genehmigungen, gesetzliche Anforderungen;
- b) vom Messdienstleister benötigte technische Daten der Anlagenbetriebsbedingungen;
- c) logistische Voraussetzungen für die Messungen wie etwa Lagerung der Ausrüstung, Stromversorgung und andere Dienste;
- d) Identifizierung der geeigneten Messstandorte;

- e) Identifizierung wahrscheinlicher Emissionsquellen und Spezies; mögliche Emissionsquellen außerhalb des Standorts sollten ebenfalls berücksichtigt werden;
- f) Identifizierung möglicherweise störender Spezies: bei komplexen Standorten kann dies Prozessinformationen oder eine vorausgehende Analyse von Luftproben im Rahmen einer Standortbegehung erfordern, um Spezies mit möglicherweise störenden Absorptionseigenschaften zu identifizieren;
- g) mögliche Standorte für Windmessungen;
- h) Beurteilung der wahrscheinlichen Windbedingungen und Verfügbarkeit existierender meteorologischer Daten.

Entsprechend den gesammelten Informationen müssen die Messziele gegebenenfalls überprüft und unter Berücksichtigung der technischen, wirtschaftlichen oder witterungsbedingten Möglichkeiten angepasst werden.

10.3 Messplanung

10.3.1 Festlegung des Messplans

Der Messplan muss auf der Grundlage der Messziele (siehe Abschnitt 6) festgelegt werden.

Insbesondere muss Folgendes festgelegt werden:

- a) Erfordernisse für Zeitpunkt und Ort der Messungen;
- b) anzuwendende Messverfahren;
- c) zu prüfende Gebiete und/oder Anlagen (Standort, Bereiche, Anlagenteile, Komponenten);
- d) erforderliche logistische Unterstützung vom Standort;
- e) Berichtsmodalitäten.

10.3.2 Zu überprüfende Gebiete und Anlagen

Die zu überprüfenden Gebiete und Anlagen müssen in dem Messplan angegeben und beschrieben werden. Die Messplanung muss die anlagenspezifischen Bedingungen berücksichtigen. Es muss geprüft werden, ob in Anbetracht des Messziels die notwendigen Messbedingungen erfüllt werden. Alternative Vorkehrungen müssen getroffen werden, wenn bestimmte Standortbereiche aufgrund der Bedingungen und des Aufbaus der Anlagen nicht in die Messungen einbezogen werden können.

10.3.3 Technischer Leiter und Personal

Das Messprogramm muss durch geeignetes Personal ausgeführt werden.

Das folgende Personal muss zu Beginn der Messung aus einer Liste kompetenter Personen im Messplan benannt werden:

- a) das für die Durchführung der Messung verantwortliche Personal;
- b) das technisch verantwortliche Personal (technischer Leiter);
- c) von der Anlage benanntes Personal, das für die Kommunikation mit dem Messteam hinsichtlich der Betriebsbedingungen während der Messungen verantwortlich ist.

Die für den Messplan ausgewählten Messzeiten sollten mit den Schichten des Werkspersonals koordiniert werden. Das verantwortliche Werkspersonal sollte während der Messungen zur Verfügung stehen.

10.3.4 Planung der Messtermine

Die Messtermine müssen im Messplan festgelegt werden. Die Termine müssen so ausgewählt werden, dass

- a) die Messziele erfüllt werden;
- b) übliche Prozessbedingungen und die übliche betriebliche Instandhaltung verfügbar sind (d. h. wenn das Werk unter den üblichen Bedingungen betrieben wird);
- c) die Infrastruktur für die Messung vorhanden und betriebsbereit ist;
- d) Personal und Hilfspersonal verfügbar sind.

10.3.5 Planung kombinierter Messungen

Werden zur Erfüllung der Messziele kombinierte Messungen mit verschiedenen Techniken durchgeführt, müssen die folgenden zusätzlichen Planungsschritte implementiert werden:

- a) ein allgemeines Messziel und ein Ablaufplan für den Einsatz der Techniken, beginnend mit den großflächigen (z. B. DIAL/SOF) zu den die Emissionsstellen lokalisierenden Techniken (z. B. OGI);
- b) Mechanismen zur Sicherstellung des Datenaustauschs zwischen den Teams während der Planungsphase, einschließlich vereinbarter Terminologie und Referenzen für Messbereiche und Messorte;
- c) vorbereitete Vorlagen für die Datenerfassung;
- d) Koordination zwischen Teams während der Messphase;
- e) Kommunikation zwischen Teams und Datenaustauschformat, z. B. für die Durchführung lokalisierter Messungen.

10.4 Vorbereitung der Messkampagne

10.4.1 Vorbereitungen durch den Anlagenbetreiber

Der Messplan muss den an dem Messprozess beteiligten relevanten Parteien in Übereinstimmung mit den Messzielen mitgeteilt werden.

Der Anlagenbetreiber muss die folgenden Vorbereitungen für die Messungen treffen:

- Festlegung der Standortanforderungen wie etwa Sicherheitsinspektion und Einweisungskurs;
- während der Messdauer müssen repräsentative Betriebsbedingungen bestehen;
- falls nicht direkt verfügbar, müssen die Messorte bereitgestellt werden;
- Erfüllung der logistischen Voraussetzungen für das Messverfahren wie etwa Lagerung der Ausrüstung, Stromversorgung und andere Dienste.

ANMERKUNG 1 Hilfspersonal kann für die Dauer der Messkampagne erforderlich sein, um das Personal, das die Messungen durchführt, zu unterstützen.

ANMERKUNG 2 Umkleideräume und gegebenenfalls ein Arbeitsraum können zu Verfügung gestellt werden.

10.4.2 Vorbereitungen durch den Messdienstleister

Der Messdienstleister muss die folgenden Vorbereitungen für die Messungen treffen:

- das notwendige Personal muss für die Dauer der Messkampagne bereitgestellt werden;
- die notwendige Messausrüstung muss für den Zeitraum der Messkampagne entsprechend den Anforderungen der einzelnen anzuwendenden Messnormen bereitgestellt werden;
- Identifizierung geeigneter Messorte aus technischer und standortlogistischer Sicht; geeignete Wetterbedingungen sollten beachtet werden;
- Flexibilität zur Anpassung an veränderliche Bedingungen;
- Messtermine müssen bestätigt werden;
- das Verfahren zur Inbetriebnahme der Messsysteme muss eingehalten werden.

10.4.3 Vorbereitungen nach dem Eintreffen an der Anlage

Die verantwortlichen Personen und der Messdienstleister müssen nach dem Eintreffen an der Anlage überprüfen, ob die folgenden in dem Messplan angegebenen Anforderungen erfüllt werden:

- a) Standortvorbereitungen vor den Messungen;
- b) Informationen zu den Betriebsbedingungen (z. B. Ausfall von Bereichen, Funktionsstörungen).

10.5 Durchführung der Messungen

Die Messungen sind nach den Verfahrensspezifikationen (siehe Anhang A bis Anhang E) durchzuführen.

10.6 Berechnung der Ergebnisse und der Messunsicherheit

10.6.1 Berechnung der Ergebnisse

Alle Ergebnisse für den Messbericht müssen entsprechend den Verfahrensbeschreibungen (siehe Anhang A, Anhang B, Anhang C, Anhang D und Anhang E) berechnet werden. Quantifizierte Emissionsraten müssen mit einer Messunsicherheit angegeben werden. Informationen zur Ermittlung der Messunsicherheit sind in 10.6.2 zu finden. Anhang G enthält ein Beispiel.

10.6.2 Ermittlung der Messunsicherheit

10.6.2.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt, wie die Unsicherheitskomponenten einer Messung ermittelt werden können. Es handelt sich dabei um zufällige und systematische Einflüsse. Für die Zwecke dieses Abschnitts bedeutet Beobachtung die einmalige (von mehreren) Messungen zur Bestimmung einer Emissionsrate. Diese Bestimmung beinhaltet grundlegende Messungen, die Umrechnung in die Konzentration, die Abbildung in einem Koordinatennetz, die Berechnung einer Rate senkrecht zur Messebene unter Verwendung von Daten zur Windgeschwindigkeit, dem vertikalen Windprofil und der Windrichtung.

10.6.2.2 Unsicherheitsquellen

Für eine Messung m , bestehend aus einer Reihe von n Beobachtungen, können Mittelwert und Standardabweichung s_m berechnet werden. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Variabilität der Beobachtung

um den Mittelwert der Messungen. Die Standardabweichung umfasst eine Reihe von während der Messung auftretenden Variabilitätsquellen:

- Variabilität der Komponenten der Beobachtung um ihre zentralen, zur Ableitung der Beobachtung verwendeten Werte (zufällige Messunsicherheit);
- Variabilität der Messgröße, d. h. entweder die Stärke der Emissionsquelle oder die zeitliche Variation des Flusses aufgrund atmosphärischer Turbulenz;
- Variabilität von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Windprofil, die im Allgemeinen bei jeder Beobachtung unterschiedlich sind und sich im Verlauf der Beobachtung ändern können;
- veränderliche Bedeutung systematischer Messunsicherheiten, wenn diese zwischen den Beobachtungen variieren. Ein Beispiel ist die Repräsentativität der Referenzwindmessungen für die Bedingungen am Beobachtungsort.

Von diesen Unsicherheitskomponenten kann die zufällige Unsicherheit durch Erhöhen der Anzahl der Messungen (Wiederholungen derselben Messung) reduziert werden. Für systematische Einflüsse, die über eine spezifische Reihe von Messungen konstant sind, gilt dies nicht.

10.6.2.3 Zufällige Unsicherheit

Die Standardunsicherheit des Mittelwerts für eine Messung i wird durch Division der Standardabweichung durch die Quadratwurzel der Anzahl der Beobachtungen n berechnet (siehe Gleichung (1)). Dies ist ein Beispiel für die Berechnung einer Unsicherheit vom Typ A. Eine vollständige Beschreibung dieser Methodik ist in [10] angegeben. Die Standardunsicherheit enthält nicht die Auswirkung systematischer Einflüsse, die während des Zeitraums von n Beobachtungen konstant sind, sondern die Schwankung von deren Einfluss auf die spezifische Beobachtungsreihe.

$$u_i = \frac{s_i}{\sqrt{n_i}} \quad (1)$$

Dabei ist

- u_i die Standardunsicherheit der Messung i ;
- s_i die Standardabweichung der Messung i ;
- n die Anzahl der Beobachtungen für Messung i .

Bei der Mittelung von m verschiedener Messungen ist die Unsicherheit u_a des berechneten Mittelwerts a der Mittelwert der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der einzelnen Standardunsicherheiten der Messung (Gleichung (2)):

$$u_a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2}}{m} \quad (2)$$

Dabei ist

- u_a die kombinierte Unsicherheit des Mittelwerts von m Messungen;
- m die Anzahl der Messungen.

Die Unsicherheit erhöht sich, wenn zwei Messungen oder die Mittelwerte von zwei Messreihen voneinander subtrahiert werden, wie bei der Korrektur um Hintergrundemissionen oder der Differenzierung von

Emissionen aus einem bestimmten Bereich von den Emissionen aus einem windseitigen Bereich. Die berechnete Standardunsicherheit ist das quadratische Mittel der Standardunsicherheit der beitragenden Messungen (u_i) oder ihrer Mittelwerte (u_a).

$$u_s = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2} \quad (3)$$

Dabei ist

u_s die kombinierte Unsicherheit der zugefügten oder subtrahierten Messungen.

Wenn bei der Subtraktion von Messungen, deren Werte oder Mittelwerte ungefähr dieselbe Größe haben, negative Emissionen impliziert werden, sollte die Vergleichbarkeit der Bedingungen, unter denen Konzentrationen in Luv und Lee gemessen wurden, überprüft werden.

Die erweiterte Unsicherheit ist die Standardunsicherheit, multipliziert mit einem Skalierungsfaktor k . Sie wird zur Festlegung eines Konfidenzintervalls für einen Mittelwert verwendet. Dies könnte in obigem Zusammenhang ein Messwert, der durch den Mittelwert mehrerer Beobachtungen gegeben ist, oder der Mittelwert mehrerer Messungen sein. Der Wert des Skalierungsfaktors hängt von der Verteilung der gemittelten Werte und dem gewünschten Vertrauensniveau ab. In diesem Dokument wird angenommen, dass die gemittelten Werte einer Student- t -Verteilung mit ν Freiheitsgraden folgen. Für ein Konfidenzintervall von 95 % ist der Faktor durch den Wert t gegeben, für den die kumulative Verteilung einen Wert von 0,025 hat.

Für eine einzelne Messung beträgt die anzuwendende Anzahl der Freiheitsgrade ($n_i - 1$) und die erweiterte Unsicherheit U_i wird durch Multiplizieren der Standardunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor $k_i(v_i)$ aus einer Standardtabelle der kumulativen t -Verteilung wie Tabelle 7 ermittelt.

$$U_i = k_i(v_i) \cdot u_i \quad (4)$$

Das Ergebnis einer Messung wird dann ausgedrückt als $\mu_i \pm U_i$, wobei μ_i der Mittelwert von n Messbeobachtungen ist.

Für eine kombinierte Messung mit dem Mittelwert einer Reihe von m Messungen oder der Summe mehrerer Messungen oder wenn Messungen um Hintergrundkonzentrationen oder windseitige Quellen korrigiert werden, werden die effektiven Freiheitsgrade anhand der Welch-Satterthwaite-Gleichung (5) berechnet:

$$\nu_{eff,c} = u_c^4 / \sum_{i=1}^m (u_i^4 / \nu_i) \quad (5)$$

Dabei ist

$\nu_{eff,c}$ die effektive Anzahl der Freiheitsgrade für die kombinierte Messung

u_c die kombinierte Unsicherheit, entweder $u_a \cdot m$ oder u_s wie in den Gleichungen (2) und (3)

Die erweiterte Unsicherheit U_c wird durch Multiplizieren der kombinierten Standardunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor $k_c(\nu_{eff,c})$ aus einer Standardtabelle der kumulativen t -Verteilung wie Tabelle 7 ermittelt.

$$U_c = k_c(\nu_{eff,c}) \cdot u_c \quad (6)$$

Das Ergebnis einer Messung wird dann ausgedrückt als $\mu_c \pm U_c$, wobei μ_c der Mittelwert, die Summe oder das Ergebnis der Subtraktion von m Messwerten ist.

Erhöht sich die Anzahl der gemittelten Werte und damit auch die Anzahl der Freiheitsgrade, nähert sich die Student- t -Verteilung der Normalverteilung und k für ein Konfidenzintervall von 95 % dem Wert 1,96 an.

Tabelle 7 — Skalierungswerte k aus der t -Verteilung für Freiheitsgrade ν für ein Vertrauensniveau von 95 %

Freiheitsgrad ν	Werte der t -Verteilung (95 %)
1	12,71
2	4,3
3	3,18
4	2,78
5	2,57
6	2,45
7	2,37
8	2,31
9	2,26
10	2,23
15	2,13
20	2,09
29	2,05
30	2,04
40	2,02
50	2,01
60	2
75	1,99
100	1,98
200	1,97
500	1,97
∞	1,96

Bei niedrigen Freiheitsgraden sollte mit Vorsicht gerundet werden, da die Skalierungsfaktoren z. B. für 3 und 4 Freiheitsgrade sehr unterschiedlich sind. Wenn beispielsweise $\nu_{eff} = 3,6$, ist die Aufrundung auf $\nu_{eff} = 4$ ($k = 2,78$) zu optimistisch, während die Abrundung auf $\nu_{eff} = 3$ ($k = 3,18$) pessimistisch, aber sicher ist. In diesen Fällen ist es vermutlich am besten, zwischen den beiden Werten zu interpolieren.

10.6.2.4 Systematische Einflüsse

Die obige Darlegung gilt für die Beschreibung der zufälligen Messunsicherheit, bei der sich die Konfidenz für den Mittelwert mit steigender Anzahl der Messungen erhöht.

Systematische Einflüsse können im Allgemeinen nur unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden, bei denen die zu messende Größe bekannt ist und eine unabhängige Kontrolle aller Komponenten des

Messverfahrens stattfindet. Dies kann zur Entwicklung von Kalibrierverfahren führen, falls die systematischen Einflüsse nicht durch Anpassung der Methodik eliminiert werden können.

Bei Umweltmessungen mit vielen unterschiedlichen systematischen Einflüssen erfolgt deren Vermeidung und/oder Kontrolle auf der Grundlage fundierter physikalischer Grundsätze und der Minimierung empirischer Eingangsgrößen. Eingangsgrößen, die zu systematischen Einflüssen führen könnten, werden identifiziert und durch Empfindlichkeitsanalysen quantifiziert. Messungen werden durch Kontroll-experimente wie bei der Entwicklung dieser Norm verifiziert.

Potenzielle Quellen systematischer Einflüsse sind beispielsweise:

- Gaszusammensetzung: Die Zusammensetzung des gemessenen Gases wird für die Ermittlung von Luftkonzentrationen (mol/m^3) aus Lichtabsorptionsmessungen und die Umrechnung in Massenkonzentrationen zur Ermittlung der Emissionsrate verwendet. Wird die Zusammensetzung nicht korrekt ermittelt, wirkt sich der Fehler auf alle Ergebnisse aus.
- Hintergrundkonzentration, windseitige Quellen, Quellen außerhalb des Standorts. Die Identifizierung von Emissionen, die Quellbereichen zugeordnet werden können, erfordert den Ausschluss von Emissionen aus anderen Bereichen. Messungen in Luv und Lee werden aus praktischen Gründen nicht gleichzeitig durchgeführt. Die Invarianz der Nettoemissionsraten zur Einfallswindrichtung und dementsprechend der windseitige Beitrag können geprüft werden. Emissionen können sich in der Praxis während des Messzeitraums ändern. Konzentrationsprofile (DIAL) und Konzentrationstraversen (SOF, TC) können zeigen, wie Quellen eine Messung beeinflussen. Auf diese Weise können die Konsistenz der Messungen und der Beitrag von Ausreißern beurteilt werden.
- Die Advektionsgeschwindigkeit der Fahne wird anhand von Referenzmessungen, einem angenommenen oder gemessenen Windprofil und Informationen über die oder Schätzungen der Fahnenhöhe berechnet. Die Emissionsrate ist proportional zur Advektionsgeschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit an der gemessenen Position der Fahne kann von der an der Position der Referenzwindmessung abweichen.
- Die Advektionsrichtung der Fahne und der Schnittwinkel zwischen der Fahne und der Messebene werden zur Berechnung der Emissionsrate verwendet. Wenn die Messebene nicht senkrecht zur Fahnenrichtung ist, wird ein Korrekturfaktor angewendet und der Korrekturgrad nimmt proportional zur Abweichung des Schnittwinkels von 90° zu. Die Windrichtung an der gemessenen Position der Fahne kann von der am Punkt der Referenzwindmessung abweichen.

10.6.2.5 Schätzung der Gesamtunsicherheit

Eine erste Schätzung der Gesamtunsicherheit ist durch die zufällige Unsicherheit gegeben, die einige systematische Einflüsse enthalten kann.

Diese systematischen Einflüsse, die alle Messungen gleichermaßen betreffen, können nicht ohne Referenzmessung bestimmt werden. Sie könnten aber durch Kalibrierung berücksichtigt werden.

Die die Messungen auf andere Weise beeinflussenden systematischen Einflüsse können aufgespürt werden. Es wird angenommen, dass der systematische Einfluss eine oder mehrere Eingangsgrößen beeinflusst. Wenn die Messung unter vollständig anderen Bedingungen wiederholt wird und denselben Wert innerhalb der Grenzen der zufälligen Unsicherheit ergibt, kann der Beitrag der systematischen Einflüsse als klein angenommen werden.

In der Praxis kann es schwierig sein, sicherzustellen, dass Schwankungen der Emissionsrate während wiederholter Messungen gering sind, da erhebliche Zeit verstreichen kann, bevor sich unterschiedliche Umgebungsbedingungen einstellen. In diesem Fall kann eine Empfindlichkeitsanalyse bezüglich der Schwankungen der berechneten Emission bei Änderung der Eingangsgrößen zur Bestimmung eines absoluten Unsicherheitsbereichs angewendet werden. Die zufällige Unsicherheit sollte zu diesem Bereich addiert werden.

Die Empfindlichkeitsanalyse kann darüber hinaus die Analyse einzelner Beobachtungen einer Messung und insbesondere die Beurteilung von Ausreißern unterstützen. Wenn die Differenz zwischen einem Ausreißer und der Messung, die den Ausreißer ausschließt, einer annehmbaren Unsicherheit der Eingangsgrößen zugeordnet werden kann, kann dies die Ermittlung der Gesamtunsicherheit leiten.

Wenn ein systematischer Einfluss identifiziert wird und schätzbar ist, kann er entweder als Korrektur für die Messwerte verwendet oder direkt als Unsicherheitsbeitrag eingebunden werden. Falls der Einfluss die Form einer systematischen Messabweichung hat, d. h. einen Faktor u_b zur Multiplikation der Messwerte, dann ist:

$$u_{t,i} = \sqrt{u_b^2 + u_i^2} \quad (7)$$

$$u_{t,c} = \sqrt{u_b^2 + u_c^2} \quad (8)$$

Dabei sind $u_{t,i}$ und $u_{t,c}$ die Gesamtunsicherheiten für eine einzelne Messung und eine kombinierte Messung, gegeben durch den Mittelwert, die Summe oder das Ergebnis der Subtraktion der m Messwerte.

Wenn der Bias-Faktor mit hoher Zuverlässigkeit ermittelt werden kann, z. B. aus einer rechteckigen Wahrscheinlichkeitsverteilung mit angenommener halber Weite a , dann sind die Freiheitsgrade der Bias-Varianz u_b , v_b unendlich. GUM [10] enthält eine Anleitung zur Umrechnung der angenommenen systematischen Messabweichung der Verteilung in die zugehörige Bias-Varianz u_b . Im Fall einer rechteckigen Wahrscheinlichkeitsverteilung der angenommenen halben Weite a gilt $u_b = a/\sqrt{3}$.

Die effektiven Freiheitsgrade für die Gesamtunsicherheit einer einzelnen Messung $v_{eff,t,i}$ und einer kombinierten Messung $v_{eff,t,c}$ werden anhand der Welch-Satterthwaite-Gleichung berechnet:

$$v_{eff,t,i} = u_{t,i}^4 / (u_i^4/v_i + u_b^4/v_b) \quad (9)$$

$$v_{eff,t,c} = u_{t,c}^4 / (u_c^4/v_{eff,c} + u_b^4/v_b) \quad (10)$$

Die gesamten erweiterten Unsicherheiten $U_{t,i}$ und $U_{t,c}$ werden durch Multiplizieren der kombinierten Gesamtunsicherheiten $u_{t,i}$ und $u_{t,c}$ mit einem Erweiterungsfaktor $k_{t,i}$ und $k_{t,c}$ aus einer Standardtabelle der kumulativen t-Verteilung wie Tabelle 7 bestimmt.

$$U_{t,i} = k_{t,i}(v_{eff,t,i}) \cdot u_{t,i} \quad (11)$$

$$U_{t,c} = k_{t,c}(v_{eff,t,c}) \cdot u_{t,c} \quad (12)$$

Die Ergebnisse einer einzelnen Messung und einer kombinierten Messung werden dann ausgedrückt als $\mu_i \pm U_{t,i}$ und $\mu_c \pm U_{t,c}$. Dabei ist μ_i der Mittelwert der n Messbeobachtungen und μ_c der Mittelwert, die Summe oder das Ergebnis der Subtraktion von m Messwerten.

10.7 Meteorologie

Quantitative Verfahren erfordern die Bereitstellung eines oder mehrerer Referenzwindmasten für Messungen in einer Höhe von 10 m. Die Masten müssen geeignet platziert werden (siehe Abschnitt 9 und Anhang F), aber die Positionen müssen vom Standort genehmigt sein, um Störungen des Betriebs zu vermeiden, eine sichere Verankerung sicherzustellen usw.

Wenn das Wind-Lidar-Verfahren angewendet wird, muss die Positionierung ebenfalls genehmigt werden.

Bestimmte Verfahren erfordern meteorologische Zwischenmessungen mit tragbaren oder mobilen Masten. Die Positionierung dieser Masten sollte als Teil des täglichen Planungsprozesses besprochen werden.

Für die Verfahren erforderliche Qualitätssicherungsschritte sollten im Hinblick auf die Bestimmung einer einheitlichen Nordrichtung für Messungen mit tragbaren/mobilen Masten, einer einheitliche Zeitbasis für die Datenaufzeichnung und die Aufzeichnung der Positionen in einer Standortkarte, um GPS-Positionsdaten zu validieren, ausgeführt werden.

Die tägliche Planung insbesondere im Hinblick auf die Messorte ist von den meteorologischen Bedingungen abhängig, die im Allgemeinen aus einer kurzfristigen Wettervorhersage erhalten werden. Nach Abschnitt 9 verarbeitete Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsdaten sollte während der Messkampagne zur Verfügung stehen, um erwartete Windrichtungen und -geschwindigkeiten zu verifizieren.

Während der durch meteorologische Messungen mit tragbaren/mobilen Masten unterstützten oder nicht unterstützten Konzentrationsmessungen sollte auf nahegelegene Strukturen geachtet werden, die den Wind lokal blockieren oder umleiten oder zu einer Kanalisierung z. B. zwischen Leitungen von Tanks oder entlang der Straßen durch Prozessbereiche führen könnten.

11 Berichterstattung

Der Messbericht muss die Anforderungen nach EN 15259 erfüllen. Insbesondere die folgenden Punkte sind zu beachten:

- Zeit und Dauer der Messungen in Verbindung mit dem Gebietstyp (Komponente, Anlagenteil, Bereich, Standort);
- Qualitätssicherungs-/Qualitätskontrollkriterien und Beschreibung aller Nichteinhaltungen;
- Beurteilung der Messungen auf der Grundlage der Ziele;
- aufgenommene Windgeschwindigkeits-, Windrichtungs- und andere meteorologische und ergänzende Daten in Verbindung mit den Messungen;
- entsprechend den Verfahrensbeschreibungen erfasste Daten (siehe Anhänge);
- geografische Position (z. B. GPS-Koordinaten);
- Beschreibung der Messgebiete;
- zweidimensionale Konzentrationskarten für Gebiete mit hoher Konzentration oder interessierende Gebiete (SOF/DIAL), sofern erforderlich;
- Darstellung der Daten auf einem Standortplan (3D-Plot) zur Visualisierung der Fahne und Identifizierung von Emissionsquellen (SOF/DIAL), sofern erforderlich;
- genaue Lokalisierung von Quellen (Karte oder GIS);
- Emissionstyp: intermittierend oder konstant;
- Ergebnisse als Emissionsraten (kg/h) einschließlich Messunsicherheit;
- Gesamt-Emissionsrate (kg/h) einschließlich Messunsicherheit.

12 Ergebnisse der Validierungs- und Anwendungs-Feldstudien

12.1 Allgemeines

Im Rahmen der Entwicklung dieses Dokuments finanzierte die Europäische Kommission die Durchführung von zwei Feldkampagnen. Bei der ersten wurde das Leistungsvermögen der Verfahren anhand kontrollierter Gasfreisetzungen an einem Industriestandort validiert. Bei der zweiten wurde die Anwendungsmöglichkeit der Verfahren an einem Raffineriestandort nachgewiesen.

Das Ergebnis dieser Arbeiten wurde in Einzelberichten der Auftragnehmer sowie in einem Gesamtbericht festgehalten, der eine Synthese und statistische Auswertung der Messdaten aus den beiden Feldkampagnen liefert. Auf Grundlage der Feldversuche wurden zusätzliche Fehleranalyseberichte erstellt.

12.2 Erste Kampagne: Validierungsstudie

Die Validierungsstudie wurde auf einem stillgelegten Raffineriestandort durchgeführt. Hauptziel war es, verschiedene Emissionsmessverfahren durch kontrollierte Freisetzungen von VOCs in einer industriellen Umgebung entsprechend ihren Verfahrensanweisungen auszuführen und zu validieren. Das Experiment wurde in einer realistisch komplexen Umgebung mit großen Strukturen und Hindernissen um die Freisetzungsapparatur herum durchgeführt. VOCs, hauptsächlich Propan, wurden aus bis zu fünf verschiedenen Knotenpunkten in einer Prozesseinheit mit einer Größe von 30 m × 30 m und drei Geschosshöhen freigesetzt. Vier der Knotenpunkte waren Punktquellen (Durchmesser des Verteilers 1 m), einer war ein Leitungsverteiler, der sich vertikal vom Boden bis zum zweiten Obergeschoss erstreckte.

Zwanzig kontrollierte Freisetzungen mit einer Dauer von jeweils 90 min wurden durchgeführt. Die Abgabe erfolgte „blind“, d. h. die Messtechniker kannten weder die Freisetzungsraten noch die bei dem jeweiligen Test aktiven Knoten. Die Messteams lieferten ihre Ergebnisse ab, bevor die Freisetzungsraten bekanntgegeben wurden. Die Freisetzungsraten reichten von 0,8 kg/h bis 18 kg/h. Diese Werte sind für die kleineren Emissionsquellen repräsentativ, die das Normverfahren erkennen sollte.

Die bei der ersten Kampagne geprüften Messkriterien sind Tabelle 8 angegeben. Die Werte wurden dem Validierungsprüfbericht und zusätzlichen Fehleranalyseberichten entnommen.

Tabelle 8 — Geprüfte und validierte Messkriterien für Anlagenteile, Größe (10 m – 50 m) × (10 m – 50 m); Lokalisierung und Quantifizierung der Emissionsquelle

Eigenschaften	DIAL	OGI	RDM	SOF	TC
Bestimmungsgrenze in kg/h	1	Nicht anwendbar	5 (1 nicht geprüft)	5 (1 nicht geprüft)	1
Erreichte Unsicherheit bei 95 % Vertrauensniveau in %	10 – 20	Nicht anwendbar	30 ^a – 80	33 ^b	30 ^b
Anzahl der einzelnen Beobachtungen	4	Nicht anwendbar	> 10	12	12
Zeit bis zum Erreichen der Quantifizierung mit der geforderten Unsicherheit in h	1	1; nur Lokalisierung	3 bis mehrere Tage	0,5 bis 1 an jedem von 3 getrennten Tagen	0,5 bis 1 bei jeder von 3 Gelegenheiten
^a Windgeschwindigkeit > 2 m/s, Emissionsrate 10 kg/h ^b validiert anhand der Messwerte für wiederholte Freisetzungen von 10 kg/h					

12.3 Zweite Kampagne: Nachweis der Anwendbarkeit der Verfahren

Eine zweite Feldkampagne wurde an einem aktiven Raffineriestandort durchgeführt. Hauptziel war es, die verschiedenen VOC-Emissionen nachzuweisen und nach Möglichkeit zu vergleichen. Die einzelnen Techniken wurden unabhängig voneinander entsprechend ihren Verfahrensanweisungen angewendet. Dies beinhaltete auch Datenanalyse und Berichte, die nach Abgabe freigegeben worden waren.

Tabelle 9 enthält Informationen über die Anwendbarkeit der Techniken auf Grundlage der Einzelberichte sowie der Synthese im Abschlussbericht.

Tabelle 9 — Nachgewiesene Anwendbarkeit der Verfahren

Emissionsquelle	DIAL	OGI	RDM	SOF	TC
Vollständiger Standort (> 500 m × > 500 m)	D/L2/ΣQ	Nicht geprüft	Nicht geprüft	D/L2/Q	D
Bereich (50 – 300 m) × (50 – 300 m)	D/L2/Q	Nicht geprüft	D/Q	D/L2/Q	D
Anlagenteil (5 m – 50 m) × (5 m – 50 m)	D/L2/Q	Nicht geprüft	Q	D/L2/Q	D/L2/Q
Komponente	Nicht geprüft	L1	Nicht geprüft	Nicht geprüft	Nicht geprüft
Typische nachgewiesene Leistungskenngrößen					
Bestimmungsgrenze	0,5 – 1 kg/h	Nicht anwendbar	1 – 5 kg/h	1 – 5 kg/h	1 – 5 kg/h
Unsicherheit	5 – 25 %	Nicht anwendbar	30 % ^a	20 – 50 %	20 – 60 %
Zeitraum zur Erreichung der erforderlichen Unsicherheit	1 h je Abschnitt/ Anlagenteil	Nicht anwendbar	3 h je Bereich/ Anlagenteil	Messzeiten von 1 h wiederholt über 3 d	1 h bei 3 Gelegen- heiten
Legende D Erkennung der Emissionsquelle L1 genaue Lokalisierung der Emissionsquelle L2 ungefähre Lokalisierung der Emissionsquelle Q Quantifizierung der Durchflussrate der Emissionsquelle Σ ermittelt durch die Summe der Bereiche ^a Windgeschwindigkeit > 2 m/s, Emissionsrate > 10 kg/h					

Anhang A (normativ)

DIAL-Verfahren

A.1 Leistungsanforderungen

Für praktische Anwendungen muss das DIAL-Verfahren für die Messung von Kohlenwasserstoffen, insbesondere VOCs im Bereich von 3 μm betrieben werden. Für bestimmte aromatische Verbindungen wie Benzol und Toluol müssen die Messungen im UV-Bereich durchgeführt werden.

Um Emissionen eines Industriestandorts zu charakterisieren, muss das DIAL-System:

- mobil/transportabel sein;
- mit optischer Strahlung augensicher nach IEC 60825-1:2014 operieren [24];

Mit der übertragenen Strahlungsenergie muss das System einen vertikalen Scan in 10 min bis 20 min mit einem akzeptablen Signal-Rausch-Verhältnis für das geforderte Messziel aufnehmen. Für VOCs sollte ein Signal-Rausch-Verhältnis von 500 für das Laserrücksignal zu einer Konzentrations-Nachweisgrenze von besser als 30 ppb für eine Fahne einer ungefähren Ausdehnung von 50 m führen. Dies entspricht einer Nachweisgrenze von besser als 0,5 kg/h unter üblichen meteorologischen Bedingungen.

- die vertikale und horizontale Ebene mit einer absoluten Richtgenauigkeit besser als ein Grad abtasten. Die relative Bewegungsgenauigkeit eines vertikalen und horizontalen Scans muss besser als $0,1^\circ$ sein;
- alle für die Datenanalyse und Qualitätskontrollen relevanten Informationen aufzeichnen (siehe A.4);
- die erforderlichen Kalibrierungen und Qualitätsprüfungen durchführen (siehe A.3);
- eine enge optische Bandbreite erzeugen, um die Empfindlichkeit zu maximieren und Querempfindlichkeiten zu reduzieren. Die optische Bandbreite sollte gleich oder kleiner der Gasabsorptionslinie sein. Im nahen Infrarot ist dies ungefähr $0,1 \text{ cm}^{-1}$;
- die Wellenlängenstabilität des Impulslasers aufrechterhalten, um Drift der ausgewählten differentiellen Absorption zu vermeiden. Dies kann erreicht werden, wenn die Stabilität besser als die optische Laserbandbreite ist, im nahen Infrarot ungefähr $0,1 \text{ cm}^{-1}$;
- die On- (durch Zielspezies absorbiert) und Off- (minimale Absorption) Wellenlängen einstellen, um das erforderliche Laserabsorptionsdifferential einzuhalten;
- schnell zwischen den On- und Off-Wellenlängen umschalten ($> 10 \text{ Hz}$), um Schwankungen der atmosphärischen Rückstreuung zwischen den On- und Off-Rücksignalen zu vermeiden;
- eine räumliche Auflösung von 10 m bis 30 m erreichen. Dies bedingt Anforderungen an Laserpulslänge ($< 10 \text{ ns}$) und Detektorbandbreite ($> 2 \text{ MHz}$);
- mehrere Windsensoren in verschiedenen Höhen einsetzen;
- die Laserausgangsimpuls-Energien kontinuierlich zu überwachen.

Diese Anforderungen würden beispielsweise durch ein DIAL-System mit folgenden Eigenschaften erfüllt:

- Transienten-Digitalisierer mit einer Bandbreite von 10 MHz – 20 MHz;
- Infrarot-Detektor mit einer Bandbreite von 2 MHz – 10 MHz;
- Sammelsystem mit einem Durchmesser von 0,5 m;
- Laser-Ausgangsleistung von mehr als 1 mJ.

Gesundheits- und Sicherheitsaspekte für bestimmte Anwendungen können sich auf die Gestaltung des DIAL-Systems auswirken. Beispielsweise sollte das DIAL-System für die Anwendung in Raffinerien ein nach EN 15004-1:2019 [25] gewartetes und geprüfetes Brandschutzsystem besitzen und alle elektrischen Anlagen sollten regelmäßig nach BS 7671:2018 [26] oder einer vergleichbaren Norm geprüft werden.

A.2 Anwendung des Verfahrens

A.2.1 Vor der Kampagne

Die durchzuführenden Messungen müssen eindeutig definiert werden. Dies beinhaltet die zu messenden Spezies, die Versuchsanordnung (Aufbau im Feld) und mögliche Störkomponenten. Die folgenden Arbeiten sollten vor der Kampagne durchgeführt werden:

- Kampagnen-Logistik: diese beinhaltet Standortbegehungen im Vorfeld (falls erforderlich) und Checklisten, um sicherzustellen, dass dem Standort die Logistik einer DIAL-Messung bekannt ist. Eine Verfahrensbeschreibung für das DIAL-Verfahren kann im Bedarfsfall vorgelegt werden.
- Gesundheit und Sicherheit: Berücksichtigung entsprechender standortspezifischer Anforderungen wie etwa Sicherheitseinweisungen oder Heißarbeitsgenehmigungen. Weiterhin eine Risikobeurteilung für standortspezifische Gefährdungen und beispielsweise die Bereitstellung geeigneter PSA.
- Auflistung und Identifizierung aller nach Kundenauftrag zu untersuchenden Gebiete auf einer Standortkarte (siehe Abschnitt über Messziele). Erstellung einer Checkliste der zu messenden Gebiete wird und Angabe von:
 - a) Ideale Windrichtung(en) für jedes zu untersuchende Gebiet unter Berücksichtigung potenzieller windseitiger Hindernisse und Windblockaden, die zu einer Kanalisierung der Emissionen führt.
 - b) Verfeinerung der idealen Windrichtung(en) für jedes zu untersuchende Gebiet unter Berücksichtigung der verfügbaren DIAL-Aufstellorte und potenzieller windseitiger Quellen.
 - c) Identifikation der Gebiete, die nur mit einer bestimmten Windrichtung gemessen werden können.
 - d) Alle Informationen oder Anforderungen, die der Kunde vorlegen kann, wie etwa erforderliches Unsicherheitsniveau oder erforderliche räumliche Auflösung.
- Auswahl der Messorte: Identifizierung geeigneter Messorte aus technischer Sicht (z. B. Messbereich, windseitige Quellen) und aus Sicht der Standortlogistik (z. B. Parkplätze und potenzielle Hindernisse).
- Identifizierung wahrscheinlicher Emissionsquellen und Spezies: Dies erfordert Informationen vom Standort, einschließlich Standortpläne und verfügbare Informationen zu Emissionen. Potenzielle Quellen außerhalb des Standorts sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Dies bedingt auch, ob Spezies wie z. B. Ethan oder Benzol gemessen werden müssen, was die VOC-Messgenauigkeit verbessern würde.
- Identifizierung potenzieller Störkomponenten: Bei komplexen Standorten kann dies Prozessinformationen oder eine vorherige Analyse von Luftproben im Rahmen einer Standortbegehung im Vorfeld erfordern, um Spezies mit potenziell störenden Absorptionseigenschaften zu identifizieren.

- Beurteilung des Windfelds: Die Messplanung beinhaltet eine Beurteilung der wahrscheinlichen Windbedingungen und eine Recherche der zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten.
- Ermittlung der Position für den meteorologischen Mast in einem freien Bereich. Sind Topographie und/oder Layout des Standorts komplex, ist die Aufstellung einer zweiten Wetterstation zu prüfen.
- Überprüfen des magnetischen Neigungswinkels des Standorts während des Messzeitraums.

A.2.2 Aufbau und erste Aufgaben

Folgendes sollte am Standort zu Beginn der Kampagne durchgeführt werden:

- Spezifische Standortanforderungen wie etwa Sicherheitsinspektion und Einweisungskurs.
- Standortbegehung, falls im Vorfeld keine Standortbegehung stattgefunden hat, Prüfen/Vereinbaren aller geeigneten Messorte mit dem Standortpersonal und entsprechende Aktualisierung der Checkliste mit den zu messenden Bereichen.
- Vereinbaren des Verfahrens für den Wechsel des DIAL-Standorts mit den Standortbetreibern wie etwa Genehmigungen, Identifizieren des Ansprechpartners, Kommunikationsprotokolle.
- Vereinbarung über die im Notfall/bei Evakuierung zu treffenden Maßnahmen (Abschaltverfahren).
- Aufstellung der meteorologischen Sensoren an den vereinbarten Standorten und Prüfen ihrer Funktion.
- Sicherstellen, dass die Instrumente und Uhren der Logger auf dieselbe Referenzzeit eingestellt sind.
- Aufbau der Laser; für jede zu messende Spezies müssen On- und Off-DIAL-Wellenlängen so eingestellt werden, dass:
 - a) Die differentielle Absorption zwischen den Wellenlängen ein ausreichendes Niveau für die erforderliche Empfindlichkeit hat. Dies erfordert eine vorherige Beurteilung der wahrscheinlichen Emissionsrate und der Systemleistung. Eine zu hohe differentielle Absorption führt zu einer Sättigung des Signals und einer Unterschätzung der Emission.
 - b) Es sind keine Absorptionseigenschaften von Störkomponenten vorhanden; dies erfordert die Kenntnis wahrscheinlicher Emissionsquellen. Der Wellenlängen müssen zumindest gegenüber üblichen atmosphärischen Störkomponenten, z. B. Wasserdampf, geprüft werden. Dies kann mithilfe einer geeigneten Spektraldatenbank wie HITRAN [27] erfolgen.
 - c) Die On- und Off-Wellenlängen sollten so nahe wie möglich beieinander liegen, um mögliche Differenzen der atmosphärischen Streuung zu minimieren.
 - d) Es muss sichergestellt werden, dass der Laser auf die korrigierte Wellenlänge abgestimmt wird und die Wellenlänge keiner Drift unterliegt.
- Aufbau des Detektors und Prüfung des Signalempfangs. Dazu gehören Prüfungen, die sicherstellen, dass das Signal-Rausch-Verhältnis hoch genug ist, um die Messziele zu erfüllen.
- Prüfen der langfristigen Wettervorhersage für den Messzeitraum. Dies ermöglicht in Kombination mit der Checkliste der unter bestimmten Windbedingungen zu messenden Gebiete die Aufstellung eines Messplans. Der Plan sollte täglich anhand kurzfristiger Wettervorhersagen aktualisiert werden. Dies ermöglicht es wiederum:
 - a) Dem Standort täglich die möglichen DIAL-Standorte mitzuteilen, um die Arbeitsgenehmigung zu vereinfachen.

- b) Im Voraus mögliche Positionen für die tragbaren Windsensoren zu identifizieren, um die Arbeitsgenehmigung zu vereinfachen.
- c) Im Voraus die Notwendigkeit von windseitigen Scans für bestimmte Gebiete zu ermitteln.
- d) Schnell zu reagieren, falls die tatsächliche Windrichtung während des Tages nicht der Vorhersage entspricht.

A.2.3 Tägliche Aufgaben

Zu Beginn jedes Messzeitraums muss sichergestellt werden, dass:

- Mitarbeiter die lokalen Vorschriften eingehalten, d. h. sich im Standortregister eingetragen haben.
- Gegebenenfalls muss eine Arbeitsgenehmigung beantragt werden.
- Die Mitarbeiter mit den lokalen Sicherheitsvorschriften vertraut sind.
- Die Aufzeichnung der meteorologischen Daten gestartet wird.
- Die optische Quelle auf die korrekte Wellenlänge entsprechend der spektroskopischen Kalibrierung eingestellt ist (siehe A.3.2).

Folgendes sollte für jeden Messort durchgeführt werden:

- Abstimmung mit dem Personal, dass die Prozessbedingungen im Zielbereich dem Messauftrag entsprechen. Dies bedeutet, dass keine ungewöhnlichen Aktivitäten stattfinden. In einigen Fällen ist es jedoch möglich, dass der Auftrag die Messung von Emissionen unter unüblichen Umständen erfordert.
- Der Messplan wird auf der Grundlage der tatsächlichen Windbedingungen festgelegt und das DIAL wird zu einer Position mit einem möglichst klaren Sichtfeld gebracht.
- Falls möglich wird ein tragbarer Windsensor an einer Position entlang der DIAL-Messsichtlinie aufgestellt, um den lokalen Wind in einer Höhe von etwa 2 m zu messen.
- Bewertung der Arbeitsplatzsicherheit für den geplanten Messort.

Während der Messung werden die folgenden Informationen aufgezeichnet:

- Messorte, meteorologische Position und Sichtlinien auf der Standortkarte.
- Dateiname, Zeit, Scanner-Azimuth und Höhe, andere spezifische Scan-Informationen.
- Standortinformationen.
- Zeitpunkt der Messungen, um die Reaktion des Detektions- und Erfassungssystems zu prüfen.
- Aktualisierung der Einträge in der Checkliste der zu messenden Gebiete. Folgendes wird aufgezeichnet:
 - a) wann die Messung eines spezifischen Gebiets abgeschlossen wurde;
 - b) ob die Messung wiederholt werden sollte, weil sie unter in der Mess-Checkliste hervorgehobenen nicht-idealen Bedingungen durchgeführt wurde (z. B. kanalisierte Emissionen aufgrund des Standorts oder nicht vorhandene Möglichkeit, windseitige Quellen zu beurteilen), oder ob mehrere Messungen zur Erreichung der geforderten Unsicherheit erforderlich sind;

- c) ob die windseitige Quelle gemessen wurde, zu messen ist oder nicht benötigt wird;
- d) ob eine Luftprobe genommen wurde.

Am Ende jedes Messzeitraums muss sichergestellt werden, dass:

- alle meteorologischen Daten heruntergeladen werden;
- alle in dem Messzeitraum erzeugten Daten gespeichert und durch ein Backup gesichert werden;
- der Organisator über den Abschluss der Messungen informiert wird, um die Arbeitsgenehmigung zu beenden;
- die Winddaten und Persistenzwerte geprüft werden, um sicherzustellen, dass die Messungen die Akzeptanzkriterien erfüllen. Andernfalls ist zu überlegen, ob die Messungen spezifischer Gebiete unter besser geeigneten Bedingungen wiederholt werden sollten.

A.2.4 Messstrategie

Die Auswahl der zu messenden Gebiete hängt von mehreren Faktoren wie Windbedingungen, verfügbaren Aufstellorten und der Sichtlinie ab:

- Für eine gegebene Windrichtung sollte das zu untersuchende Gebiet nach Prioritäten ausgewählt werden, sodass:
 - a) Gebiete, die nur mit dieser spezifischen Windrichtung gemessen werden können, priorisiert werden.
 - b) Bei geringer Windgeschwindigkeit von unter etwa 2 m/s sollte nach Möglichkeit vorzugsweise ein relativ offener Bereich anstatt eines Bereichs mit einem potenziell komplexeren Windprofil gemessen werden. In den letzteren Fällen besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass die Windpersistenzwerte außerhalb der Grenzen für Quantifizierungsmessungen liegen.
 - c) Unter Berücksichtigung der Bereichsauflösung des DIAL-Systems, der aktuellen meteorologischen Bedingungen und der Systemempfindlichkeit ein DIAL-Standort für die Messung des interessierenden Bereichs verfügbar ist.
 - d) Der untersuchte Bereich frei von windseitigen Quellen ist.
 - e) Falls windseitige Quellen vorhanden sind, können diese entweder von demselben Standort oder einem anderen DIAL-Standort unter vergleichbaren Windbedingungen gemessen werden.
 - f) Beim Wechsel zu einer neuen Position sollte die Messung des windseitigen Beitrags des zuvor gemessenen Bereichs priorisiert werden, wenn eine solche Messung erforderlich und möglich ist.
 - g) Wenn der Standort so gestaltet ist, dass mehrere Bereiche in Windrichtung zueinander liegen, sollte (nach Möglichkeit) zuerst der Bereich gemessen werden, in dem kein windseitiger Beitrag vom übrigen Standort auftritt. Als zweiter Bereich sollte der direkt in Windrichtung zum ersten Bereich gelegene Bereich gemessen werden und so weiter. Auf diese Weise würde der windseitige Beitrag für jeden Bereich gemessen, bevor der Bereich selbst gemessen wird.
- Bei der Wahl der Scan-Sichtlinie sollte berücksichtigt werden, dass:
 - a) Das Windfeld in nahem Abstand zur Emissionsquelle aufgrund vorhandener Gebäude ein potenziell komplexes Verhalten aufweisen könnte. Wo immer möglich sollte ein tragbarer Windsensor an einer Position entlang der DIAL-Mess-Sichtlinie eingesetzt werden.

- b) Die Emissionen bei höherer Windgeschwindigkeit werden schneller verdünnt, was zu einer Reduzierung der Umgebungskonzentration führt. Höhere Konzentrationen werden daher näher am Emissionsbereich erhalten.
- c) Der Mindestabstand für Messungen zum DIAL-Instrument.

ANMERKUNG Der Mindestabstand beträgt aufgrund der optischen Baugruppe üblicherweise 50 m bis 100 m.

— Ein Scan sollte so eingerichtet werden, dass:

- a) Die Mess-Sichtlinie soweit wie möglich frei von Hindernissen ist.
- b) Der höchste Elevationswinkel hoch genug ist, um eine von dem höchsten Punkt des untersuchten Bereichs emittierte Fahne einzuschließen.

ANMERKUNG Dies kann durch einen Erkundungs-Scan abgeschätzt werden.

- c) Wenn eine Fahne von dem letzten Elevationswinkel aus beobachtet wird, würde dies darauf hindeuten, dass nicht alle Emissionen in der Messung erfasst werden und zusätzliche Linien in dem nächsten Scan hinzugefügt werden sollten, um die gesamte Fahne zu erfassen.
- d) Wenn in der letzten Elevationslinie eine deutliche Erhöhung der VOC-Konzentration gegenüber der Hintergrundkonzentration beobachtet wird, könnte dies auf eine diffuse windseitige Quelle/Hintergrund oder eine diffusen Quelle aus dem untersuchten Bereich zurückzuführen sein. Im letzteren Fall sollten im nächsten Scan zusätzliche Linien hinzugefügt werden, um die gesamte Quelle zu erfassen. Im vorherigen Fall müssen keine zusätzlichen Linien hinzugefügt werden und die Konzentration über dem Hintergrund kann bei der Analyse genutzt werden, um den windseitigen Hintergrundbeitrag in der Messebene einzuschätzen, wenn eine spezifische windseitige Messung nicht verfügbar ist. Welcher der beiden Fälle das wahrscheinlichste Szenario ist, sollte auf der Grundlage des Standort-Layouts und der Kenntnis der potenziellen windseitigen Quellen beurteilt werden.
- e) Die gewählte DIAL-Scanrate ist in dem Bereich, in dem eine Fahne aus dem Untersuchungsgebiet erwartet und/oder beobachtet wird, innerhalb der durch die Nachweisgrenze (Signal/Rauschen) bestimmten Grenzen so hoch wie möglich. Die Scanrate wird durch die Wiederholfrequenz des Laserimpulses und die Anzahl der Laserimpulse, die bei der Mittelwertbildung ausreichend sind, um das erforderliche Signal-Rausch-Verhältnis für die Datenanalyse zu erreichen, bestimmt.
- f) Die Gesamterfassungsdauer des Scans beträgt nach Möglichkeit weniger als 20 min.
- g) Die Schrittweite zwischen zwei aufeinanderfolgenden Linien darf nicht größer als zwei Grad sein und sollte für Messungen in Bereichen > 300 m Entfernung zum DIAL geringer sein.
- h) In Anbetracht der obigen Beschränkungen sollte die Anzahl der Messlinien zur Erfassung einer Fahne maximiert werden.
- i) Wenn das Signal-Rausch-Verhältnis während der Messungen für die erforderliche Reichweite unter ein akzeptables Maß fällt, sollte die Mittelungszeit erhöht oder ein anderes Messgebiet gewählt werden, in dem eine kürzere Reichweite erforderlich ist.

Um die Qualitätsanforderungen für das Messziel zu erfüllen, sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Es werden mindestens vier DIAL-Scans für jede Sichtlinie durchgeführt, um die Unsicherheit zu minimieren.

- Es werden ein oder zwei zusätzliche Messreihen für denselben Bereich entlang anderer Scanlinien oder von anderen Positionen aus oder an einem anderen Tag durchgeführt, um die Unsicherheit in Verbindung mit diesem Bereich zu reduzieren, sofern durch das Messziel festgelegt.
- Gegebenenfalls vorhandene windseitige Quellen werden gemessen.
- Alle notwendigen Qualitätssicherungsmessungen und -überprüfungen werden durchgeführt.
- Wenn die Detektor-Bandbreite variiert werden kann, wird der am besten geeignete Wert ausgewählt. Je höher die Bandbreite (d. h. höhere räumliche Auflösung), desto stärker ist das Rauschen. Eine höhere räumliche Auflösung kann daher unter vorteilhaften atmosphärischen Bedingungen ausgewählt werden. Unter unvorteilhaften Bedingungen bei geringem DIAL-Rauschabstand darf eine geringere Bandbreite ausgewählt werden.
- Luftproben werden an Positionen genommen, die Hinweise auf die tatsächlichen Zusammensetzung der mit DIAL gemessenen Emissionsquellen geben.

A.3 Qualitätskontrolle

A.3.1 Allgemeines

Qualitätssicherung für Emissionsmessungen ist erforderlich. Die Maßnahmen erfordern eine ausführliche Projektplanung und Überwachung des Fortschritts. Es wird empfohlen, interne Überprüfungen als Teil der Datenanalyse durchzuführen.

A.3.2 Spektroskopische Kalibrierverfahren

A.3.2.1 Allgemeines

Eine genaue Kenntnis der tatsächlichen differentiellen Absorptions-Koeffizienten, die für eine bestimmte Messung geeignet sind, ist eine wesentliche Voraussetzung für DIAL-Messungen von hoher Qualität. Die folgenden Kalibrierverfahren sollten angewendet werden, um die spektroskopische Qualität und somit die Genauigkeit der differentiellen Absorptionsmessungen sicherzustellen. Die folgenden drei Hauptelemente müssen durch diese Überprüfungen verifiziert werden:

- Eine geeignete Kalibrierreferenzzelle, die mit einem bekannten (Konzentrations*Pfadlänge)-Parameter vorbereitet wurde.
- Die Laserquelle arbeitet mit einer ausreichend engen Linienbreite, um das betrachtete Spektralmerkmal ausreichend aufzulösen.
- Die Wellenlänge der Laserquelle ist fest und stabil bei den entsprechenden On- und Off-Resonanzwellenlängen.

A.3.2.2 Kalibriergase

Eine Standardgas Mischung des Zielgases (oder ein repräsentatives Hilfgas, z. B. Propan oder Pentan für Gesamtkohlenwasserstoff-Messungen) sollte als Referenz für die spektroskopischen Messungen verwendet werden. Diese Standards sollten nach Möglichkeit gravimetrisch erstellt, international rückführbare Referenzgas Mischungen mit einer absoluten Genauigkeit des Volumenmischverhältnisses von 0,1 % oder besser sein.