TEXTE
46/2019

Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich

Abschlussbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 46/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716622080
UBA-FB 002795

Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich

Abschlussbericht

von

Dr. Norbert Weis, Dr. Chris Vanessa Hutter-Sumowski, Alina Meyer,
Dr. Britta Neuweger
Bremer Umweltinstitut GmbH, Bremen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Bremer Umweltinstitut
Gesellschaft für Schadstoffanalysen und Begutachtung mbH
Fahrenheitstr. 1
28359 Bremen

Abschlussdatum:
Oktober 2018

Redaktion:
Fachgebiet II 1.3 Innenraumhygiene, gesundheitsbezogene Umweltbelastungen
Anja Daniels

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Ziel der Studie ist es, die in VDI 4300 Blatt 7 beschriebene Bestimmungsmethode für Luftwechselraten mit Tracergasen abzusichern oder ggf. Hinweise zur Weiterentwicklung zu geben.

Hierfür wird zum einen die wissenschaftliche Literatur bzgl. des aktuellen Stands der Technik sowie zur gesundheitlichen Bewertung der verwendeten Tracergase evaluiert. Zum anderen wird in kontrollierten Mess-Szenarien untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse bei Einsatz verschiedener Tracergase und Messmethoden gemäß VDI 4300 Blatt 7 unterscheiden. Die Ursachen für eventuelle Abweichungen werden erörtert und die Ergebnisse so aufbereitet, dass sie bei zukünftigen Raumluftuntersuchungen berücksichtigt werden können.

Abstract

The aim of this study is to validate the method for determination of air change rates using tracer gases as currently described in standard VDI 4300 sheet 7. If applicable, advice for further refinement will be given.

Therefore, in a first step, the scientific literature is evaluated for the state of the art in air change rate measurements as well as for health impairments of the applied tracer gases. In a second step, air change rate measurements are performed in a well controlled environment to determine the agreement of results when using different tracer gases and measuring methods according to VDI 4300 sheet 7. Possible causes for disagreement are discussed and detailed to support future studies on air change rates in indoor environments.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei den Mitarbeitern des Bremer Umweltinstituts für die technische Unterstützung im Kammerbereich sowie die Mitarbeit an Vorbereitungen und Validierung der analytischen Methode bedanken. Besonders danken wir Julia Loftfield, Lars Roehrs, Tino Gimon, Kjell Christoph, Florian Nitschke und Ulrike Siemers.

Carola Digel hat uns maßgeblich in stilistischen Fragen der englischen Textteile beraten und wir danken auch ihr für ihre Unterstützung.

Nicht zuletzt danken wir dem Umweltbundesamt für die Förderung des Projekts und Frau Anja Daniels sowie Herrn Klaus-Reinhard Brenske für ihre Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 6
Abbildungsverzeichnis 9
Tabellenverzeichnis 12
Abkürzungsverzeichnis 14
Zusammenfassung 17
Summary 25
1 Einleitung 32
2 Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft 32
2.1 Literaturrecherche zum Thema Bestimmungsmethoden der Luftwechselrate in Innenräumen 32
2.1.1 Normative Literatur 32
2.1.2 Wissenschaftliche Literatur 34
2.1.2.1 Review-Artikel 35
2.1.2.2 Literaturdaten zu allgemeinen Voraussetzungen, Einflussfaktoren und Fehlerquellen 37
2.1.2.3 Literaturdaten zur Genauigkeit einzelner Methoden 40
2.1.2.4 In der Literatur verwendete Tracergase und Messgeräte 44
2.2 Literaturrecherche zur toxikologischen Bewertung der eingesetzten Tracergase 77
2.2.1 Schwefelhexafluorid (SF_6) CAS-Nr. 2551-62-4 78
2.2.2 Distickstoffmonoxid (N_2O) CAS-Nr. 10024-97-2 79
2.2.3 Kohlendioxid (CO_2) CAS-Nr. 124-38-9 80
2.2.4 Hexafluorbenzol (HFB, C_6F_6) CAS-Nr. 392-56-3 81
2.2.5 Octafluortoluol/Perfluortoluol (OFT, C_7F_8) CAS-Nr. 434-64-0 83
2.2.6 Perfluordecalin (PFD, $C_{10}F_{18}$) CAS-Nr. 306-94-5 84
2.2.7 Perfluornaphthalin (PFN, $C_{10}F_8$) CAS-Nr. 313-72-4 85
2.2.8 Übersicht Grenz- und Richtwerte 86
3 Geräte, Materialien und Qualitätssichernde Maßnahmen 90
3.1 Messkammer und Realraum 90
3.2 Passive Emissionsmethode – Materialien, Durchführung, Auswertung und Qualitätssicherung 92
3.2.1 Herstellung konstant emittierender Emissionsröhrchen für Tracergase Hexafluorbenzol, Perfluortoluol und Perfluordecalin 92
3.2.2 Aufbau und Validierung der Analytik für Hexafluorbenzol, Perfluortoluol, Perfluordecalin 95
3.2.2.1 Richtigkeit 98

3.2.2.2 Wiederholpräzision 98
3.2.2.3 Laborpräzision 99
3.2.2.4 Selektivität/Spezifität 99
3.2.2.5 Linearität 100
3.2.2.6 Nachweis- und Bestimmungsgrenze 102
3.2.2.7 Robustheit 102
3.2.2.8 Zusammenfassung Validierung 103
3.2.3 Bestimmung Sättigungskurven der Tracergase Hexafluorbenzol, Perfluortoluol und Perfluordecalin 103
3.2.3.1 Prüfkammer 104
3.2.3.2 Realraum 104
3.2.4 Probenahme und Berechnung der Luftwechselraten im Realraum (passive Emissionsmethode) 105
3.3 Konzentrations-Abklingmethode –Materialien, Durchführung, Auswertung und Qualitätssicherung 106
3.3.1 Geräte und Materialien der Konzentrations-Abklingmethode 106
3.3.2 Zusätzliche Evaluationen zur Durchführung der Messungen im Realraum 109
3.3.2.1 Prinzipielle Eignung von Innova 1312 und Testo 435 für den Methodenvergleich 110
3.3.2.2 Einfluss der parallelen Messung von SF_6, CO_2 und N_2O mit dem Innova 1312 ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten 110
3.3.2.3 Durchmischung im Realraum 111
3.4 Validierung der Tracergas-Messungen in Prüfkammern mit definiertem Luftwechsel (Passive Emissionsmethode und Konzentrations-Abklingmethode) 113
4 Bestimmung der Luftwechselraten in einem Realraum - gleichzeitiger Einsatz mehrerer Tracergase bei verschiedenen Lüftungsstufen und Lüftungsszenarien 116
4.1 Methodik der Messungen im Realraum 116
4.2 Ergebnisse der Luftwechselratenbestimmung im Realraum 116
4.2.1 Lüftungsstufe 0 mit abgedichtetem Lufteinlass und –auslass 116
4.2.2 Lüftungsstufe 1 118
4.2.3 Lüftungsstufe 3 119
4.2.4 Lüftungsstufe 4 121
4.2.5 Lüftungsszenario: Messung nach 8 Stunden geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und -auslass offen) 123
4.2.6 Lüftungsszenario: 10 Minuten Stoßlüftung 124
4.2.7 Lüftungsszenario: Kipplüftung 126
4.2.8 Lüftungsszenario: Geöffnetes Fenster 127

5 Eignung eines emittierenden Feststoffes (Perflournaphthalin) als Tracergas – erste Ergebnisse 129

6 Diskussion der Ergebnisse 133

6.1 Genauigkeit und Fehlerquellen bei der Bestimmung von Luftwechselraten 133

6.2 Welches Gas ist geeignet – gesundheitliche Aspekte und grundsätzliche Anforderungen 142

6.3 Praktische Schlussfolgerungen 143

7 Quellenverzeichnis toxikologischer Daten 145

8 Quellenverzeichnis Luftwechselraten 149

9 Anhang zu Abschlussbericht „Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich“ 156

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: a) Foto des Büroraumes in südöstlicher Richtung mit Blick auf die Fensterfront; b) Grundriss mit Länge, Breite und der dazugehörigen Fläche des Büroraumes 91

Abbildung 2: PFT-Emissionsquellen verschiedener Geometrie (DR, SV, Certan©, Glasvial 2 mL und 9 mL (nur für Feststoff PFN)) 93

Abbildung 3: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten der verwendeten Emissionsröhrchen im Vergleich zur Raum- bzw. Kammertemperatur am Messtag 94

Abbildung 4: Kalibriergerade PFO, nicht-linear 97

Abbildung 5: Kalibriergerade PFD 97

Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Selektivität im unteren Konzentrationsbereich (Probe F336-101) 99

Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Spezifität im Realraum bei Lüftungsstufe 0 (Probe F341-10) 100

Abbildung 8: Zehnpunkt-Kalibrierung von HFB auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980) 100

Abbildung 9: Zehnpunkt-Kalibrierung von OFT auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980) 101

Abbildung 10: Zehnpunkt-Kalibrierung von PFD auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980) 101

Abbildung 11: Fünfpunkt-Kalibrierung des internen Standards Toluol-d8 auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980) 102

Abbildung 12: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD in einer 1 m³ Prüfkammer bei eingestellter LWR von 1 h^{-1} 104

Abbildung 13: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD im Realraum bei Lüftungsstufe 4 105

Abbildung 14: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD im Realraum bei Lüftungsstufe 2 105

Abbildung 15: Veränderung der gemessenen Konzentrationen mit Innova 1312 bei Zugabe der verschiedenen Tracergase ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten 110

Abbildung 16: Gemessene LWR bei voreingestellter LWR 0,5 h^{-1} in der Prüfkammer. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Kammertemperatur 114

Abbildung 17: Gemessene LWR bei voreingestellter LWR 1,0 h^{-1} in der Prüfkammer. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Kammertemperatur 115

Abbildung 18: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 0 (abgedichtete Lüftung). Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 117

Abbildung 19: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 1. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 118

Abbildung 20: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 3. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 120

Abbildung 21: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 4. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 122

Abbildung 22: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum nach 8 h geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und –auslass offen). Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit....123

Abbildung 23: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Stoßlüftung 10 min. Links oben: gewichtete Mittelwerte Abklingmethode ganzer Messzeitraum; rechts oben: PFT-Methode; links Mitte: Abklingmethode während der Stoßlüftung; rechts Mitte: Abklingmethode nach der Stoßlüftung; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 125

Abbildung 24: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Kipplüftung. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit 127

Abbildung 25: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei geöffnetem Fenster. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit....128

Abbildung 26: Mikroskopisches Bild einzelner Kristalle des Feststoffes Perfluornaphthalin....130

Abbildung 27: Fünfpunkt-Kalibrierung von PFN 130

Abbildung 28: Gemessene LWR (PFN) in der 0,25 m^3-Prüfkammer bei eingestellter LWR von 1 h^{-1}. 132

Abbildung 29: Gemessene LWR (PFN) im Realraum bei Lüftungsstufe 0. 132

Abbildung 30: Darstellung der prozentualen Abweichung von Soll- und Referenzwerten für CO_2 – erweiterter Vergleich der Auswertemethoden....134

Abbildung 31: Prozentuale Abweichung der Luftwechselraten vom Sollwert (voreingestellte Luftwechselrate in der Kammer) – Mittelwert über fünf Messungen pro Tracergas 135

Abbildung 32: Prozentuale Abweichung der Luftwechselraten vom Sollwert (eingestellte Lüftungsstufe im Realraum) oder SF_6-Referenzwert – Mittelwert über fünf Messungen pro Tracergas. Oben: Abklingmethode; unten: PFT-Methode....136

Abbildung 33: Links: Zusammenhang zwischen Schwankungen des Temperaturgradienten (innen-außen) und RSD der LWR pro

Messreihe. Rechts: Zusammenhang zwischen Höhe der LWR und RSD der LWR pro Messreihe 137

Abbildung 34: Mittlere LWR (mit Darstellung der mittleren relativen Standardabweichungen) bestimmt mittels Abklingmethode – Übersicht über alle Mess-Szenarien 138

Abbildung 35: Mittlere LWR (mit Darstellung der mittleren relativen Standardabweichungen) bestimmt mittels PFT-Methode – Übersicht über alle Mess-Szenarien....138

Abbildung A1: Exemplarische Abklingkurve im Realraum bei Stoßlüftung am Beispiel N_2O (Proben-Nr. F341-254) 156

Abbildung A2: Einfluss des ausgewerteten Zeitraums auf das Ergebnis der Abklingmethode bei sehr niedrigen LWR. Beispiel: N_2O im Realraum nach 8 h geschlossenem Fenster (Proben-Nr. F341-3)....156

Abbildung A3: Prüfkammerversuch: Reduktion der LWR von 1 h^{-1} auf 0,9 h^{-1} zum Zeitpunkt 0,25 h. Verlauf der Abklingkurve an den Beispielen N_2O und SF_6 157

Abbildung A4: Parameter der verwendeten TD-GC/MS-Methode 158

Abbildung A5: Vorlage Messprotokoll....159

Abbildung A6: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 0: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 161

Abbildung A7: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 1: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 162

Abbildung A8: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 3: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 163

Abbildung A9: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 4: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 164

Abbildung A10: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung nach 8 h geschlossenem Fenster: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 165

Abbildung A11: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung mit Stoßlüftung: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 166

Abbildung A12: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung mit Kipplüftung: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 168

Abbildung A13: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung bei geöffnetem Fenster: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode 169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über wissenschaftliche Publikationen zum Thema „Bestimmungsmethoden der Luftwechselrate in Innenräumen“ 46

Tabelle 2: Übersicht verwendeter Tracergase – Messbereiche im Vergleich zu MAK-Werten 86

Tabelle 3: Übersicht verwendeter Tracergase – Grenzwerte in Luft, Wassergefährdungsklassen und Treibhauspotential 87

Tabelle 4: Volumenströme und theoretische Luftwechselraten im Realraum mit technischer Lüftung 91

Tabelle 5: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten (ER) der verwendeten Emissionsröhrchen mit RSD 94

Tabelle 6: Vergleich HFB-Konzentrationen mittels Innova 1312 und PFT-Methode 96

Tabelle 7: Einfluss der Auswertemethode auf die Luftwechselrate mittels CO_2-Abklingmethode – Messung nach 8 h ungelüftet 109

Tabelle 8: Einfluss der Auswertemethode auf die Luftwechselrate mittels CO_2-Abklingmethode – Messung Lüftungsstufe 1 109

Tabelle 9: Einfluss der parallelen Messung verschiedener Tracergase auf berechnete LWR – Abklingmethode ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten in Prüfkammer bei LWR 1 h^{-1} 110

Tabelle 10: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas SF_6 bei Lüftungsstufe 1 112

Tabelle 11: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas N_2O bei Lüftungsstufe 1 112

Tabelle 12: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas CO_2 bei Lüftungsstufe 1 112

Tabelle 13: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen in der Prüfkammer (voreingestellte LWR 0,5 h^{-1})[a)] 114

Tabelle 14: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen in der Prüfkammer (eingestellte LWR 1,0 h^{-1})[a)] 115

Tabelle 15: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 0 (Lüftung abgedichtet)[a)] 117

Tabelle 16: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 1 119

Tabelle 17: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 3 120

Tabelle 18: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 4 122

Tabelle 19: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen nach 8 h geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und –auslass offen)[a)] 124

Tabelle 20: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen gemittelt über 10 min Stoßlüftung und 110 min nach Stoßlüftung bei geschlossenem Fenster 126

Tabelle 21: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörigen Standardabweichung der fünf Messungen während und nach einer Stoßlüftung von 10 min (nur Abklingmethode) 126

Tabelle 22: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Kipplüftung 127

Tabelle 23: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei geöffnetem Fenster 129

Tabelle 24: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten der PFN Emissionsröhrchen mit Angabe des RSD 131

Tabelle A1: Prüfkammermessung bei voreingestellter LWR 0,5 h^{-1}: Luftwechselraten und Klimadaten 160

Tabelle A2: Prüfkammermessung bei voreingestellter LWR 1,0 h^{-1}: Luftwechselraten und Klimadaten 160

Tabelle A3: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 0: Luftwechselraten und Klimadaten 160

Tabelle A4: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 1: Luftwechselraten und Klimadaten 162

Tabelle A5: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 3: Luftwechselraten und Klimadaten 163

Tabelle A6: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 4: Luftwechselraten und Klimadaten 164

Tabelle A7: Realraum-Messungen nach 8 h geschlossenem Fenster: Luftwechselraten und Klimadaten 165

Tabelle A8: Realraum-Messungen, Abklingmethode, während und nach 10 min Stoßlüftung: Luftwechselraten 166

Tabelle A9: Realraum-Messungen, PFT-Methode, Mess-Szenario Stoßlüftung: Luftwechselraten und Klimadaten 166

Tabelle A10: Realraum-Messungen mit Kipplüftung: Luftwechselraten und Klimadaten 168

Tabelle A11: Realraum-Messungen bei geöffnetem Fenster: Luftwechselraten und Klimadaten 169

Abkürzungsverzeichnis

AT	Österreich
BATS	Brookhaven Atmospheric Tracer Sampler
BNL	Brookhaven National Library
C&L	Classification and Labelling (Einstufung und Kennzeichnung)
Cal/OSHA	Division of Occupational Safety and Health of California (Kalifornische Arbeitsschutz-behörde)
CAS	Chemical Abstracts Services
CATS	Capillary Adsorption Tracer Sampler (Kapillaradsorptionsröhrchen)
$CBrF_3$	Bromtrifluormethan (Freon R13B1)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH	Schweiz
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CS_2	Kohlenstoffdisulfid
CT	Emissionsquelle aus Certan© Kapillarhalsgläschen
CV	Coefficient of Variation (Variationskoeffizient)
DE	Deutschland
DR	Emissionsröhrchen aus Glaspipette und Teflonmembran
ECD	Electron Capture Detector (Elektroneneinfangdetektor)
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
EPA	Environmental Protection Agency (US-amerikanische Umweltschutzbehörde)
ER	Emissionsrate
FID	Flammenionisationsdetektor
GC/ECD	Gas-Chromatograph mit Elektroneneinfangdetektor
GC-MS	Gas-Chromatograph mit Massenspektrometer
GDL	Gefahrstoffdatenbank der Länder
GESTIS	Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
GG	Gleichgewicht
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
He	Helium
HFB	Hexafluorbenzol
HMIS	Hazardous Materials Identification System (freiwilliges US-amerikanisches Gefahrenklassifikationssystem für die Arbeitsplatzumgebung)
HSDB	Hazardous Substances Data Bank
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Heizung, Lüftung, Klimatechnik)
IGS	Informationssystem gefährliche Stoffe des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
IR	Infrarot
k. A.	Keine Angabe

Konz.	Konzentration
LC_{50}	Mittlere letale Konzentration
LC_{LO}	Niedrigste bekannte letale Konzentration
ln	Natürlicher Logarithmus
LT	Litauen
LWR	Luftwechselrate
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MAK Peak	Spitzenbegrenzung der Arbeitsplatzkonzentration (DE) / Kurzzeitwert (AT)
MAK Schicht	Maximale Arbeitsplatzkonzentration als Schichtmittelwert (8 Stunden)
MEG	Military Exposure Guideline
MW	Mittelwert
N_2O	Distickstoffmonoxid
n. a.	Nicht anwendbar
NDIR	Nichtdispersive Infrarottechnologie
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (US-amerikanische Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung)
Nr.	Nummer
NTRL	National Technical Reports Library (Literaturdatenbank des National Technical Information Service, einer US-amerikanischen Behörde zur Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus staatlich geförderten Projekten))
nwg	Nicht wassergefährdend
OFT	Octafluortoluol (Perfluortoluol)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (US-amerikanische Bundesbehörde Arbeitsschutz)
PAC	Protective Action Criteria
PATS	Programmable Atmospheric Tracer Sampler
PDCB	Perfluordimethylcyclobutan
PDCH	Perfluordimethylcyclohexan
PE	Polyethylen
PEL	Permissible Exposure Limits
PFAB	Perfluoroallylbenzene
PFD	Perflunafen (Perfluordecalin)
PFN	Perfluornaphtalin
PFO	Perfluoroktan
PFT	Perfluocarbontracer
PMCH	Perfluormethylcyclohexan
PP	Polypropylen
ppm	Parts per million (10^{-6})
PTFE	Polytetrafluorethylen
QSAR	Quantitative Structure-Activity Relationship

REACH	Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals (Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien gem. europäischen Chemikalienrecht)
Ref.	Referenz
resp.	respektive
rF	Relative Luftfeuchtigkeit
RSD	Relative Standardabweichung
RU	Russland
SDB	Sicherheitsdatenblatt
SF_6	Schwefelhexafluorid
STD	Standardabweichung
SV	Emissionsquelle aufgebaut aus Vial und Kanüle
t	Zeit
T, Δ_T	Temperatur, Temperaturgradient
TD	Thermodesorption
UBA	Umweltbundesamt
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
v	Geschwindigkeit
V	Emissionsquelle Typ „Vial“
vgl.	vergleiche
vs.	Versus (gegenübergestellt, im Vergleich zu)
WGK	Wassergefährdungsklasse
ZNS	Zentralnervensystem

Zusammenfassung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden im vorliegenden Forschungsbericht Daten zur Qualitätssicherung zur Bestimmung von Luftwechselraten mittels Tracergasen erhoben und ausgewertet. Hierzu wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu den Themen Bestimmungsmethoden von Luftwechselraten sowie gesundheitliche Bewertung eingesetzter Tracergase durchgeführt und evaluiert. In einem zweiten Teil wurden Messungen mit zwei Methoden (Konzentrations-Abklingmethode, passive Emissionsmethode) und sechs verschiedenen Tracergasen (Schwefelhexafluorid, Kohlenstoffdioxid, Distickstoffmonoxid, Hexafluorbenzol, Perfluortoluol, Perfluordecalin) in kontrollierten Mess-Szenarien durchgeführt und im Hinblick auf die Fragestellung ausgewertet.

In die **Literaturauswertung** wurden 81 Veröffentlichungen **zum Thema Bestimmung von Luftwechselraten mittels Tracergasen** einbezogen. Mehrere Review-Artikel wurden ausgewertet (Sherman 1980, Sherman 1989, Sherman 1990, Sherman 2014, Persily 1997, Persily 2016, Sundell 2006, Laussmann 2011, Mahyuddin 2012, Dols 1995), von denen einige auch einen Überblick über weitere Anwendungsmöglichkeiten von Tracergastechniken geben (z. B. Persily 1997, Roulet 2002 und Raatschen 2002). Mehrheitlich benutzten die Autoren in der ausgewerteten Literatur die gängigen Methoden wie Konzentrations-Abklingmethode (auch in der Form als Build-Up-Methode) und Konstant-Injektionsmethode (sowohl mit aktiver wie passiver Injektion und Probenahme) wie in den gängigen Richtlinien und Normen beschrieben. Einige Studien stellen neue Methoden vor, wobei häufig weniger die prinzipielle Messmethode als vielmehr Details in der Ausführung oder Auswertung verändert werden. Eine Mehrzahl der Studien verwendet die Tracergase Schwefelhexafluorid (SF_6), Kohlenstoffdioxid (CO_2) oder einen/mehrere Perfluorcarbontracer (PFT). 27 Literaturstellen bezogen SF_6-Messungen mit ein, 29 CO_2-Messungen (20 davon mit metabolischem oder atmosphärischem CO_2) und 40 PFT-Daten (Hexafluorbenzol (HFB) 9 Studien, Perfluortoluol (OFT) 4 Studien). Die Methoden mittels metabolischem und atmosphärischem CO_2, die in 20 der evaluierten Studien verwendet oder bewertet wurden, sind in der derzeit gültigen Fassung der deutschen Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 bisher nicht genauer beschrieben.

Die Veröffentlichungen unterscheiden sich deutlich darin wie detailliert über methodische Aspekte und Messtechnik berichtet wird. Auch die Betrachtung von Messunsicherheiten und weiteren möglichen Fehlerquellen wird in den Publikationen sehr unterschiedlich gehandhabt. Zu diesem Schluss kommt auch Persily 2016 in einem umfangreichen Review mit dem Titel „Field measurement of ventilation rates“. Auch die Vorgaben in Richtlinien und Normen zu notwendigen messtechnischen Details, Versuchsdurchführung, qualitätssichernden Maßnahmen und Fehlerbetrachtung unterscheiden sich deutlich (vgl. Kapitel 2.1.1: VDI 4300 Blatt 7, DIN EN ISO 16000-8, DIN EN ISO 12569, ASTM E741, ASTM D6245, Nordtest-Methoden).

Weitere umfangreiche Review-Artikel oder vergleichende Studien wie etwa Dols 1995, Mahyuddin 2012 oder Sundell 2006 berichten ebenfalls zu diesem Thema. Dols 1995 weist darauf hin, dass je nach Messmethodik unterschiedliche Anteile des Luftaustausches im Messergebnis enthalten sind. Mahyuddin 2012 arbeitet heraus welche Mess-Strategien von Experten des Gebiets und in Veröffentlichungen gewählt werden und berichtet, dass zwar übereinstimmend Richtlinien für sinnvoll erachtet werden, weniger als die Hälfte der befragten Experten aber eine existierende Richtlinie zum Thema (in diesem Fall ASTM D6245) kennt. Der Literatur-Review von Sundell 2006 zeigt wie wenige Studien vorliegen, die methodisch ausreichend gut dokumentiert sind und Daten zum Zusammenhang von Luftwechsel und Gesundheit vorlegen.

Die Messunsicherheiten und Gesamtfehler für die Methoden und Tracergase, die im praktischen Teil der vorliegenden Arbeit eingesetzt wurden (Konzentrations-Abklingmethode mittels SF_6, CO_2, N_2O (Distickstoffmonoxid, Lachgas) und PFT-Methode mit Hexafluorbenzol (HFB), Perfluortoluol (OFT) und Perfluordecalin (PFD)), werden daher in der Literatur in einem weiten Bereich angegeben. Die

Ursache für die weite Streuung der Angaben liegt nicht zuletzt darin, dass unterschiedliche Faktoren in die Messunsicherheiten und Fehlerbetrachtung einbezogen wurden und keine einheitlichen Referenzpunkte verwendet wurden. Zudem gibt es eine Vielzahl an Parametern, in denen sich die Messungen im Detail unterscheiden, die jedoch Einfluss auf die angegebene Luftwechselrate (LWR) haben. Hierzu zählen unter anderem Eigenschaften des Tracergases, eingesetzte Messgeräte, aktive oder passive Injektion und Probenahme, Auswertezeitraum und –methoden, Position von Ausgabe und Probenahme der Tracergase, Durchmischung im Raum, Geometrie der Emissionsquellen bei PFT-Methode und Zufluss in die gemessene Zone aus angrenzenden Bereichen, die den meist benutzten Ein-Zonen-Ansatz beeinträchtigen.

Für die Abklingmethode mittels SF_6 werden sowohl Über- als auch Unterschätzung der gemessenen Luftwechselraten in einem Bereich von -13 % bis +16 % beschrieben (vgl. z. B. Chao 2004, Chao 2014). Bennett 2011 gibt einen Fehler aus Literaturdaten von 20-30 % an, Dietz 1982 beschreibt eine Messunsicherheit für die SF_6-Abklingmethode von 15 %, Dols 1995 gibt eine Unsicherheit von 10 % an und von Shaw 1984 wird eine Übereinstimmung mit voreingestellten Luftwechseln von 91 % angegeben. Die Variabilität ihrer Daten werden von Almeida 2017 mit 30-57 % und von Howard-Reed 2002 mit 27-50 % berichtet.

CO_2 wird in der evaluierten Literatur selten als aktiv zugegebenes Tracergas für die Abklingmethode eingesetzt (8 der 29 Studien mit Bezug auf CO_2-Messungen). Zudem wird oft ein einfacherer und günstigerer CO_2-IR-Sensor verwendet während in unseren Daten auch für CO_2 vorwiegend ein photoakustischer Monitor zum Einsatz kam. Für die CO_2-Abklingmethode mit Sensor oder Spektrometer wurde von Cui 2015 bei optimalen Bedingungen und Auswertung über die Regressionsmethode ein Fehler von 5 % bestimmt. Zusätzliche Fehler können gemäß Cui 2015 durch falsch positionierte Probenahme (bis zu 28 %) oder falsch gewählten Auswertezeitraum (bis zu 10 %) entstehen. In Sekhar 2004 sind Unterschätzungen der Luftwechselrate im Vergleich zu SF_6-Messungen von bis zu 27 % beschrieben. Von Shaw 1984 wird eine Übereinstimmung mit voreingestellten Luftwechseln von 101 % angegeben.

In der von uns ausgewerteten Literatur wurde N_2O lediglich in 7 Studien verwendet, von denen 6 die Konzentrations-Abklingmethode einsetzten. Bzgl. der Genauigkeit der N_2O-Ergebnisse geben Grimsrud 1980 und Niemelä 1991 Abweichungen von mittlerem Alter der Luft resp. der Luftwechselraten gegenüber SF_6-Werten von 9 % resp. 2 % an. Von Shaw 1984 wird eine Übereinstimmung mit voreingestellten Luftwechseln von 98 % angegeben.

Zur Genauigkeit der PFT-Methode liegen diverse Studien vor. Eine Mehrzahl dieser Quellen bezieht sich auf Ergebnisse mittels passiver Probenahme, wohingegen wir eine aktive Probenahmestrategie gewählt haben. Von den Studien, die eine aktive Probenahme verwendet haben, nennt Dietz 1982 eine Unsicherheit von 15 %, Cheong 1995 fand eine Unterschätzung der Luftwechselrate bei aktiver Probenahme vs. den Resultaten eines direktanzeigenden Geräts von 7 % und auch Bennett 2011 gibt eine Unterschätzung der Luftwechselrate bei aktiver Probenahme an. Krooß 1997 konnte aus Parallelmessungen eine Variabilität von 9 % ableiten.

Die **Datenlage zur gesundheitlichen Bewertung der eingesetzten Tracergase** unterscheidet sich bzgl. Umfang und Aufbereitung in ausgeprägtem Maße. Während für SF_6, CO_2 und N_2O umfangreiche Daten und Erfahrungen vorliegen, ist es für die PFTs schwieriger toxikologische Daten zu finden. Auch Richtwerte (v. a. Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen, MAK-Werte) existieren in Deutschland nur für die drei erstgenannten Gase. Die MAK-Werte in der derzeit gültigen Fassung von VDI 4300 Blatt 7 sind bzgl. der Spitzenbegrenzung dieser Gase nicht mehr aktuell und müssen diesbezüglich überarbeitet werden.

Übereinstimmend wird in der recherchierten Literatur SF_6 in hohen Reinheitsgraden mit sehr geringer Toxizität angegeben. Der MAK-Wert liegt dementsprechend hoch und deutlich über den üblichen Messbereichen für Luftwechselraten-Messungen. Trotz der hohen Genauigkeiten beim Einsatz von SF_6

als Tracergas (vgl. z. B. unsere Daten) steht der umfänglichen Nutzung ein sehr hohes Treibhauspotential mit einem GWP-Wert (global warming potential) von 22.800 entgegen.

CO_2 ist für den Körper kein Fremdstoff und daher aus gesundheitlicher Sicht zumindest bei Einhaltung des MAK-Werts als gesundheitlich unbedenklich einzuschätzen. Auch der GWP-Wert, der definitionsgemäß bei 1 liegt, gehört zu den niedrigsten der eingesetzten Gase. Schwierigkeiten ergeben sich für CO_2 aus messtechnischer Sicht, da CO_2 eine hohe Hintergrundkonzentration aufweist und Querempfindlichkeiten der Messgeräte beachtet werden müssen.

Obwohl N_2O schon sehr lange als Anästhetikum eingesetzt wird, variiert die gesundheitliche Bewertung je nach Quelle erheblich. Während für SF_6 und CO_2 die Arbeitsplatzgrenzwerte international übereinstimmen, liegt z. B. der deutsche MAK-Wert um ein Vierfaches über dem in den USA vom National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) empfohlenen Schichtmittelwert. Vor allem in der Frage der reproduktionstoxikologischen Relevanz differieren die Bewertungen der Länder. Da die N_2O-Messbereiche der Geräte, die für Bestimmungen der Luftwechselrate eingesetzt werden, teilweise über dem MAK-Wert liegen, ist hier Vorsicht beim Einsatz geboten. Probleme ergeben sich auch aus der hohen Wasserlöslichkeit und aus Querempfindlichkeiten einiger Messgeräte. Zudem ist das Treibhauspotential mit einem GWP-Wert von 298 deutlich höher als bei CO_2.

Für die PFTs ist die Datenlage für eine umfassende Bewertung nicht ausreichend. Auch wenn die chemische Struktur darauf hindeutet, dass die Substanzklasse chemisch inert ist und damit auch nicht metabolisiert wird, liegen für einzelne Vertreter Hinweise auf toxische Relevanz vor. Da von den hier eingesetzten Substanzen v. a. Perfluordecalin (PFD) als Arzneimittel verwendet wird, ist hier die Datenlage noch am aussagekräftigsten und weist auf eine sehr geringe Toxizität hin. Für PFD waren jedoch die Ergebnisse unserer Untersuchungen mit der größten Unsicherheit behaftet und das Treibhauspotential liegt mit GWP >7500 sehr hoch. Die beiden ungesättigten Vertreter mit sehr geringer toxikologischer Datenlage zeigten vielversprechendere Ergebnisse in unserer Studie und weisen mit einem für die Substanzklasse auf 1 geschätzten GWP-Wert ein deutlich vorteilhafteres Treibhauspotential auf.

Im praktischen Teil wurden Messungen zur Bestimmung der Luftwechselrate in **Prüfkammern** aus Glas und in einem für die Messungen optimierten Büroraum (**Realraum**) durchgeführt. Die Prüfkammern werden routinemäßig für Emissionsmessungen verwendet und unterliegen daher bzgl. der Dichtheit, der Schadstoff-Freiheit und der Genauigkeit der Durchflussregelung der ständigen Qualitätssicherung des akkreditierten Instituts.

Der Realraum wurde mit einer dezentralen Lüftung mit Wärmerückgewinnung und manuell steuerbaren Lüftungsstufen ausgestattet. Die Dichtheit des Raumes wurde zu Projektbeginn mittels Blower-Door-Verfahren überprüft und erhöht. Der Raum verfügt zudem über drei Fenster, die geöffnet werden können, so dass folgende Mess-Szenarien realisiert werden konnten: Messungen bei Lüftungsstufe 0 mit abgedichteten Lüftungsteilen, bei verschiedenen regelbaren Lüftungsstufen bis zu einem theoretischen Luftwechsel von 0,95 h^{-1}, sowie im Zustand nach 8 Stunden ohne Lüftung, bei Kipplüftung, bei Stoßlüftung und bei geöffnetem Fenster. Bestimmt wurden die Luftwechselraten mittels Konzentrations-Abklingmethode und den Tracergasen SF_6, CO_2 und N_2O (Detektion mit photoakustischem Monitor und CO_2-Infrarot-Sensor (IR-Sensor)) sowie mittels PFT-Methode und den Tracergasen HFB, OFT und PFD (passive Emission und aktive Probenahme, Analytik mittels Thermodesorption und Gaschromatograph mit Massenspektrometer (TD-GC/MS)).

Zur Vorbereitung des praktischen Teils wurde zunächst eine **Validierung der PFT-Methode** für HFB, OFT und PFD durchgeführt. Emissionsquellen wurden in verschiedenen Geometrien hergestellt und ihre Eignung bzgl. Konstanz und Höhe der Emissionsrate untersucht. Für die Validierung wurden einheitlich Diffusionsquellen verwendet, die angelehnt an Shinohara 2010 aus Glasvials mit Septum und durchgestochener Kanüle aufgebaut waren. Die Emissionsraten wurden durch Wägung der Emissi-

onsquellen und Korrelation der Gewichtsdifferenz zur verstrichenen Zeitdauer bestimmt. Die Probenahme erfolgte mittels aktiver Probenahme (Zweikanal-Membranpumpe BIVOC2 Pumpe) auf Doppelbettröhrchen mit Tenax® TA und Carbopack™, die Analyse mittels Thermodesorption und anschließender gaschromatographischer Auftrennung mit massenspektrometrischer Detektion (TD-GC/MS). Berechnet wurden die Luftwechselraten aus gemessenem Analytgehalt, Probenahmevolumen, Emissionsrate der Quelle und effektivem Kammer-/Raumvolumen. Ein zunächst für HFB geplanter Vergleich zwischen Ergebnissen der TD-GC/MS-Auswertung und Konzentrationsbestimmungen mittels direktanzeigendem photoakustischem Monitor wurde verworfen, da sich bereits in ersten Versuchen eine erhebliche Diskrepanz zwischen den Konzentrationen ergab. Zudem wies die HFB-Anzeige auf dem photoakustischen Monitor eine ausgeprägte Querempfindlichkeit zu SF_6 auf, das bei allen weiteren geplanten Messungen parallel ausgegeben wurde.

Validiert wurden die Parameter Richtigkeit (Wiederfindung Labor und Kammer), Präzision (Wiederholpräzision Labor und Kammer, Laborpräzision Labor), Selektivität/Spezifität (Selektivität Labor und Spezifität Realraum), Linearität (Labor), Nachweis- und Bestimmungsgrenze (Labor) und Robustheit (Lagerung und Variation der Kammer-LWR). Selektivität und Spezifität wurden für alle drei Substanzen in zwei Konzentrationsbereichen nachgewiesen. Die Nachweisgrenzen lagen bei 0,06-0,09 µg/m³ und der lineare Arbeitsbereich konnte für alle drei Substanzen auf 2-650 µg/m³ festgelegt werden. Die Richtigkeit der Kammerproben wurde auf 85-91 % bestimmt. Die Wiederholpräzision der Kammerproben lag mit einer relativen Standardabweichung von <5 % in einem sehr guten Bereich. Für steigende Luftwechselraten wurde in der Kammer ein Anstieg der Variabilität (relative Standardabweichung, RSD) beobachtet. Dies ist vor allem auf stärker abweichende Ergebnisse für PFD zurückzuführen. Da für PFD mit dem Aufbau der Emissionsquellen angelehnt an Shinohara 2010 nur niedrige Emissionsraten erzielt wurden, sind die entsprechenden Luftkonzentrationen bei höheren LWR gering und kleine Schwankungen wirken sich bereits stark auf das Ergebnis aus, so dass auf ausreichend hohe Emissionsraten beim Aufbau der Emissionsquellen geachtet werden muss. Für die Messungen im Realraum wurden daher andere Quellen-Geometrien getestet und eingesetzt. Aus der Validierung ergeben sich zudem folgende Aspekte, die in den weiteren Messungen berücksichtigt werden müssen: eine ausreichend lange Equilibrierzeit der Emissionsquellen im zu messenden Volumen sowie ausreichende Sorgfalt beim Ansetzen der Standardlösungen aufgrund der geringen Löslichkeit einzelner Analyte.

Um die Equilibrierzeit für die weiteren Messungen in Prüfkammer und Realraum zu evaluieren, wurden Sättigungskurven bestimmt. Die entsprechenden Sättigungskonzentrationen wurden in einer 1 m³-Prüfkammer bei einer LWR von 1 h^{-1} für HFB, OFT und PFD nach ca. 2 Stunden erreicht. Im Realraum, in dem die weiteren Messungen geplant waren, waren je nach eingestellter Lüftungsstufe ebenfalls 2 Stunden (Lüftungsstufe 4, LWR berechnet nach Herstellerangaben 0,95 h^{-1}) respektive 4-6 Stunden notwendig (Lüftungsstufe 2, LWR berechnet nach Herstellerangaben 0,50 h^{-1}).

Auch für die **Konzentrations-Abklingmethode** wurden vor den geplanten Mess-Szenarien einige Parameter separat evaluiert. Da die CO_2-Konzentrationen parallel mit einem photoakustischen Monitor (Innova 1312) und einem IR-Sensor (Testo 435) gemessen werden sollten, wurden die angezeigten Konzentrationen und die daraus berechneten Luftwechselraten in einem Vorversuch abgeglichen. Während die reinen Konzentrationswerte deutlich voneinander abwichen, stimmten die aus dem jeweiligen Abklingverhalten berechneten LWR ausreichend gut überein (mittlere Abweichung <10 %). Auch die bekannten Querempfindlichkeiten bei IR-Detektion zwischen CO_2 und N_2O wurden betrachtet und das Ergebnis war ebenfalls, dass sich die Konzentrationswerte der Gase bei ausgeschalteter Korrektur am Messgerät stark gegenseitig beeinflussten, die aus den Abklingkurven berechneten LWR jedoch im Bereich von 5 % übereinstimmen (Vergleich von Messungen mit und ohne parallele Ausgabe des jeweils anderen Gases). Dennoch wurden die folgenden Messungen mit automatischer Korrektur der Querempfindlichkeit am Messgerät durchgeführt. Die ausreichende Durchmischung im Realraum wurde durch Messungen an verschiedenen Probenahmeorten überprüft und bei gewähltem Vor-

gehen verifiziert (Ausbringung der Gase bis die Konzentrationsanzeige des photoakustischen Monitors konstante Werte anzeigte, Durchmischung unterstützt durch einen Ventilator). Die Luftwechselraten wurden aus den Abklingkurven mittels exponentieller Regression bis maximal zur doppelten Hintergrundkonzentration bestimmt. Der Bereich des exponentiellen Abfalls wurde optisch bestimmt durch halblogarithmische Darstellung und Auswahl des in dieser Darstellung linearen Bereichs. Durch die Korrelationskoeffizienten der Ausgleichskurven lag ein Maß für die Überprüfung der Auswahl vor. Auch für CO_2 wurden die gemessenen Konzentrationen direkt ohne Abzug der Hintergrund- oder Außenluftkonzentration verwendet. Diese Auswertung, die von VDI 4300 Blatt 7 abweicht, wurde zunächst für zwei Mess-Szenarien verifiziert und führt in den überprüften Messungen zu einer Unterschätzung der Luftwechselrate um bis zu 13 %. Wird hingegen die Hintergrundkonzentration als konstanter Wert vor Auswertung abgezogen, werden die Luftwechselraten um bis zu 26 % überschätzt (Details finden sich in den Abschnitten 3.3.1 und 6.1). Um den Fehler möglichst gering zu halten, wurden die direkt gemessenen Konzentrationen ausgewertet und dabei mit hohen Startkonzentrationen gearbeitet, die wie die anderen Gase auch nur bis zur doppelten Hintergrundkonzentration ausgewertet wurden. Die Messzeit variierte je nach Mess-Szenario, wann immer möglich wurden 120 min gemessen.

Die Vorbereitungen wurden durch **Validierungsmessungen für beide Methoden und alle sechs Gase in einer 1 m³-Prüfkammer** bei zwei verschiedenen Luftwechselraten abgeschlossen. Der Variationskoeffizient pro Tracergas und eingestellter Luftwechselrate lag für alle sechs Gase und beide Methoden bei <10 %. Die Abweichung von den voreingestellten Luftwechselraten lag für die Abklingmethode je nach Tracergas bei <1 % (SF_6), <15 % (N_2O, Unterschätzung der LWR) und <20 % (CO_2, Unterschätzung der LWR unabhängig von Messgerät). Die Ergebnisse der PFT-Methode wichen um bis zu +3 % und -19 % von den Sollwerten ab, die beste Übereinstimmung wurde mit HFB erreicht (+3 % bis -8 %).

Wie eingangs erwähnt wurden im **Realraum acht Mess-Szenarien** realisiert. Diese wurden jeweils fünffach gemessen und die Ergebnisse ausgewertet. Bei fünf dieser Szenarien waren die Fenster geschlossen und die Luftwechselraten wurden im Wesentlichen durch Infiltration (Lüftungsstufe 0 mit und ohne abgedichtete Lüftungsteile) oder die Lüftungseinstellungen bestimmt (Lüftungsstufen 1, 3 und 4).

Durchgeführt wurden die Messungen im oben beschriebenen Büroraum des Instituts. Die Probenahme zur Bestimmung von Abklingkurven für die Tracergase SF_6, CO_2 und N_2O erfolgte minütlich mittels Innova 1312 und Testo 435. Beide Geräte wurden in der Mitte des Raumes auf Tischhöhe positioniert. Die BIVOC2-Pumpen für die PFT-Probenahme wurden ebenfalls mittig und auf Tischhöhe mit einem Abstand von ca. 2 m von den Emissionsquellen positioniert.

Die Emissionsquellen wurden mindestens 8 Stunden vor Messbeginn, in der Regel über Nacht, in den Untersuchungsraum eingebracht. Die Tracergase für die Konzentrations-Abklingmethode wurden manuell aus Gasflaschen oder Teflonbeuteln ausgebracht. Um eine vollständige Durchmischung der Gase mit der Raumluft sicherzustellen, wurden die Messungen erst 10 Minuten nach Ausbringen der Tracergase SF_6, CO_2 und N_2O gestartet, während des Ausbringens der Gase wurde ein Tischventilator eingesetzt, um die Luft zu durchmischen. Die Luftproben für HFB, OFT und PFD wurden für die Mess-Szenarien Lüftungsstufen 0, 1 und 3 sowie 8 h ungelüftet vor Ausbringung der Gase CO_2, N_2O und SF_6 entnommen. Bei den Mess-Szenarien Stufe 4, offenes Fenster, Kipplüftung und Stoßlüftung wurden die PFT-Proben jeweils am Ende der Abklingmessungen entnommen. Die Probenahmedauer der PFT-Proben betrug jeweils 10 min. Die Probenahmedauer der Abklingmethode konnte bis zu zwei Stunden betragen.

Die Streuung der gemessenen Luftwechselraten pro Methode/Gas-Kombination war bei den niedrigen Luftwechselraten von Lüftungsstufe 0 (abgedichtet) und nach 8 Stunden ohne Lüftung (Lüftung nicht zusätzlich abgedichtet) insgesamt hoch. Für die Abklingmethode ergaben sich betrachtet über jeweils

fünf Messungen pro Szenario RSD-Werte von bis zu 12 % für SF_6, bis zu 20 % für N_2O, bis zu 12 % für CO_2 und bis zu 9 % für CO_2 detektiert mit IR-Sensor. Für die PFT-Methode lagen die Werte deutlich höher mit RSD-Werten von bis zu 31 % (HFB), 56 % (OFT) und 18 % (PFD). Die Abweichungen von den SF_6-Referenzwerten lagen bei bis zu 16 % (N_2O), 10 % (CO_2), 19 % (CO_2 mit IR-Sensor), 19 % (HFB), 24 % (OFT) und 10 % (PFD).

Für die Mess-Szenarien, die durch die Lüftungsanlage bestimmt wurden, lag die Variabilität innerhalb der Abklingmethoden deutlich niedriger (RSD bis zu 5 % (SF_6), 13 % (N_2O), 5 % (CO_2) und 11 % (CO_2 IR-Sensor). Die PFT-Methode wies speziell für PFD deutlich höhere Variationskoeffizienten von bis zu 57 % auf (max. RSD 13 % (HFB), 22 % (OFT) und 57 % (PFD)). Die Abweichungen zu den Sollwerten, berechnet aus den Herstellerangaben zur Lüftungsanlage, lagen zwischen -7 % bis +5 % für SF_6. Für die anderen Gase der Abklingmethode wurden durchgehend Ergebnisse unterhalb der erwarteten Werte mit bis zu -24 % für N_2O, -21 % für CO_2 und -31 % für CO_2 mit IR-Sensor bestimmt. Für die PFT-Methode fielen neben den Streuungswerten auch die Abweichungen von den Sollwerten höher aus und zeigten keinen einheitlichen Trend zur Über- oder Unterschätzung. Abweichungen lagen zwischen -11 % und +36 % für HFB, -14 % und 1 % OFT und bis zu -41 % für PFD. Da sich aus diesen Daten kein einheitlicher Trend zur Über- oder Unterschätzung abzeichnet, sind vermutlich keine signifikanten Senkeneffekte (die einheitlich zu niedrigeren Luftkonzentrationen und damit zur Überschätzung der LWR führen) für die Abweichungen verantwortlich. Da die Bestimmung der Emissionsraten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist und die realen Emissionsraten durch Temperaturschwankungen oder je nach Quellengeometrie auch durch Luftzug variabel sind, sind Einflüsse auf die Qualität der vorliegenden Ergebnisse durchaus denkbar.

Für Mess-Szenarien mit geschlossenen Fenstern wurden damit die stablisten Ergebnisse mittels der Abklingmethode erhalten. Für SF_6 ergeben sich die Werte mit der besten Übereinstimmung zum Sollwert. Diese weisen eine maximale mittlere Abweichung von 7 % (Lüftungsstufe 4) und geringe Variationskoeffizienten von max. 12 % (Lüftungsstufe 0) auf. Insgesamt liegt die Variabilität innerhalb der Messreihen und Gase bei Detektion mit photoakustischem Monitor bei max. 20 % (N_2O Lüftungsstufe 0) und die Abweichungen von Soll- oder SF_6-Referenzwert bei max. 24 % (N_2O Lüftungsstufe 1). Mit der PFT-Methode werden RSD-Werte von bis zu 57 % (PFD, Lüftungsstufe 1) und maximale Abweichungen vom Sollwert bis zu 41 % (PFD, Lüftungsstufe 1) beobachtet.

Die Mess-Szenarien mit geöffnetem Fenster, die aus theoretischen Überlegungen deutlich anfälliger für Störungen sein sollten, liefern dagegen innerhalb der Methoden/Gas-Kombinationen insgesamt niedrigere Variationskoeffizienten mit maximalen RSD-Werten von 10 % bei den Messungen mit Abklingmethode und 23 % bei den Messungen mittels PFT-Methode. Die Abweichungen der berechneten Luftwechselraten von den SF_6-Referenzwerten liegen dagegen sehr hoch und alle mittleren Luftwechselraten für andere Methoden/Gas-Kombinationen liegen unterhalb der SF_6-Ergebnisse. Innerhalb der Abklingmethode lässt sich ein klarer Trend beobachten mit berechneten LWR $SF_6 > N_2O > CO_2 > CO_2$ mit IR-Sensor. Während die N_2O-Ergebnisse max. 16 % unterhalb der Referenzwerte liegen, wurden für CO_2 bis zu 31 % und für CO_2 mit IR-Sensor bis zu 57 % niedrigere Werte berechnet. Speziell für CO_2 können für diese Szenarien störende Effekte durch schwankende und höhere Außenluftkonzentrationen nicht ausgeschlossen werden.

Auch die Ergebnisse der PFT-Methode liegen bis zu 69 % unterhalb der SF_6-Werte. Hier ist jedoch kein einheitlicher Trend innerhalb der Tracergase erkennbar.

Im Zusammenhang betrachtet wird deutlich, dass die PFT-Methode tendenziell besser für Langzeitmessungen geeignet ist. Zum einen können temporäre Schwankungen der Emissionsraten aus den Quellen die Ergebnisse signifikant beeinflussen, so dass über längere Zeiträume gemittelte Werte diese Schwankungen zuverlässiger ausgleichen. Zum anderen kann z. B. bei Messungen in dynamisch veränderbaren Lüftungsszenarien wie etwa bei geöffneten Fenstern nicht sichergestellt werden, dass sich die Tracergaskonzentration zum Messzeitpunkt im Gleichgewichtszustand befindet.

Eine Korrelation der gemessenen LWR mit Klimadaten wie Temperaturdifferenz oder Windgeschwindigkeiten kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden, da die Luftwechselraten im Wesentlichen durch die mechanische Lüftung bestimmt werden. In einzelnen Messungen ohne Lüftungsgerät kann ein Zusammenhang vermutet werden, die Anzahl an Messungen (fünf pro Szenario) ist jedoch zu gering um eine statistische Auswertung durchzuführen. In unseren Daten besteht ein schwacher Zusammenhang zwischen der Variabilität innerhalb der Messreihen und der zugehörigen Schwankung der Temperaturdifferenz innen-außen. Zumindest die höchsten beobachteten RSD-Werte von 12-20 % für die Abklingmethode und 31-57 % für die PFT-Methode wurden bei Messreihen beobachtet, bei denen die Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur stark schwankte. Zugleich handelt es sich hierbei jedoch um die drei Messreihen mit den niedrigsten Luftwechselraten, so dass auch kleine Schwankungen der Absolutwerte bereits die relative Standardabweichung stark beeinflussen können. Da diese Effekte auf der Grundlage unserer Daten nicht separiert werden können, können auch hieraus keine eindeutigen Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

Neben den genannten Tracergasen wurde in einem ersten Versuch ein Feststoff, Perfluornaphthalin (PFN), als Emissionsquelle eingesetzt. Während erste Ergebnisse aus Kammermessungen vielversprechend waren (Variationskoeffizient über fünf Messungen 3 %, mittlere Abweichung von eingestellter LWR 14 %), konnten diese im Realraum nicht verifiziert werden. Bei Lüftungsstufe 0 wurden fünf Messungen durchgeführt, deren Ergebnis im Mittel bei einem RSD von 20 % um einen Faktor von 11 über dem Referenzwert von SF_6 liegt und damit nicht plausibel ist. Um das Ergebnis abzusichern wurde diese Messung wiederholt, führte jedoch zum gleichen Ergebnis (RSD 6 %, Überschätzung der LWR um Faktor 10). Ein erster Hinweis auf eine signifikante Fehlerquelle ergibt sich aus den deutlich schwankenden Emissionsraten, die unter verschiedenen Lagerbedingungen (Abzug, Realraum) auch bei ähnlichen Temperaturen ermittelt wurden. Weitere Untersuchungen zu Ursachen hierzu stehen noch aus.

Zusammenfassend ergibt sich aus der ausgewerteten Literatur, dass die konventionellen Methoden zur Bestimmung von LWR mittels Tracergasen (wie in VDI 4300 Blatt 7 genannt) weiterhin häufig eingesetzt werden. Auch die Tracergase, die Anwendung finden, entsprechen in der Mehrzahl den dort genannten Tracertypen. Vor allem SF_6, PFT und CO_2 werden häufig verwendet wobei als PFT häufig die von Dietz 1982 eingeführten Tracergase eingesetzt werden. Für CO_2 werden zudem neue Ansätze evaluiert, um die Genauigkeit beim Einsatz von metabolischem oder atmosphärischem CO_2 zu verbessern. Diese Methoden sind in der deutschen Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 bisher nicht im Detail beschrieben.

Für alle Tracergase gilt zudem die Notwendigkeit ihre gesundheitliche Bewertung und ihr umweltschädigendes Potential mit zu berücksichtigen. Die Angaben zu MAK-Werten in VDI 4300 Blatt 7 sind in einigen Punkten veraltet (Spitzenbegrenzungen) und eine Überarbeitung sowie Ergänzung ist anzustreben. Unter gesundheitlichen Aspekten kann es zudem sinnvoll sein, weitere Methoden zu evaluieren, die den Einsatz von Tracergasen reduzieren. Hier sind z. B. Methoden, die auf metabolische und atmosphärisch vorkommende Gase zurückgreifen oder Methoden mit sehr niedrigen Nachweisgrenzen zu nennen.

Sowohl die Literaturauswertung als auch unsere Ergebnisse belegen, dass Messungen von Luftwechselraten mit großen Unsicherheiten behaftet sein können. Während die am häufigsten eingesetzten Methoden, Konzentrations-Abklingmethode und Konstant-Injektionsmethode, in allen betrachteten Fällen die Größenordnung der Luftwechselrate korrekt wiedergeben, können dennoch Fehler von 5 % bis zu über 50 % auftreten. Einige Autoren schätzen die Fehlerbreite noch deutlich höher bis zu einem Faktor von zwei ein. Wichtig ist daher für alle Messungen die Fragestellung genau zu definieren, die Anteile, die durch die jeweilige Messung erfasst werden, offenzulegen (Infiltration, Zufluss aus angrenzenden Zonen etc.) und die Details der Messparameter zu dokumentieren. Dem Messprotokoll kommt damit eine wichtige Bedeutung zu. Vor der Durchführung von Messungen sollten Fragen zur Durchmischung, der Messposition, der Zonen-Anzahl, passive oder aktive Ausgabe und Probenahme der Gase

sowie Mess- und Auswertedauer geklärt werden und klimatische Bedingungen innen und außen dokumentiert werden. Für die Abklingmethode muss die Durchmischung schnell gewährleistet werden, die Eigenschaften der Gase in Bezug auf ihre Messbarkeit (z. B. Querempfindlichkeiten) und die daraus resultierende Ungenauigkeit sowie die Messbereiche der verwendeten Geräte müssen bedacht werden. Für die PFT-Methode müssen das effektive Volumen, die Geometrie der Emissionsquellen, die Konstanz und ausreichende Höhe der Emissionsraten, die Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration, Genauigkeit von Analytik und Auswertungsoptionen sowie Eigenschaften der Gase bzgl. ihres Emissionsverhaltens (ggf. auch Senkeneffekten) geprüft werden. Ähnliches gilt auch für die anderen verfügbaren Methoden wie Konstant-Konzentrationsmethode oder direkte Messungen von Volumenluftströmen, deren spezifischen Parameter vor Einsatz evaluiert werden müssen. Die bestehende Richtlinie enthält hier zu einigen Punkten Anmerkungen, eine Vertiefung und detailliertere Handreichung wäre insgesamt hilfreich.

Unsere Daten unterstützen insgesamt die Ergebnisse der Literaturauswertung sowohl hinsichtlich Eignung der Tracergase als auch Faktoren, die bei den Messungen zu berücksichtigen sind. Für alle eingesetzten Tracergase konnten zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden solange die Methoden-spezifischen Randbedingungen beachtet wurden. Für unsere Kurzzeitmessungen konnten mittels SF_6 und der Abklingmethode die besten Übereinstimmungen mit voreingestellten Luftwechseln erreicht werden. In Szenarien, in denen viel Tracergas eingesetzt werden muss und aus Gründen des Umwelt- oder Gesundheitsschutzes andere Alternativen gesucht werden, kann CO_2 trotz etwas größerer Streuung und Messunsicherheit als Alternative genutzt werden. Von den hier eingesetzten Gasen sollte lediglich N_2O aus Vorsorgegründen vermieden werden. Langzeitmessungen in bewohnten Räumen können bei Berücksichtigung der oben diskutierten Aspekte mittels der PFT-Methode mit ausreichender Genauigkeit, wenn auch mit einer weniger hohen Kontrolle über einzelne Parameter, durchgeführt werden. Der Einsatz neuer PFT wie etwa des Feststoffes PFN benötigt weitergehende Untersuchungen, um adäquate Emissionsquellen und damit ausreichende Genauigkeiten zu erhalten. Auch Senkeneffekte müssen vor einem möglichen Einsatz solcher Feststoffe weiter evaluiert werden. Die Frage welches Tracergas und welche Methode zu wählen sind, hängt daher vor allem von der konkreten Fragestellung, den räumlichen Gegebenheiten und dem Mess-Szenario ab.

Summary

This report was prepared to give an account of work sponsored by the German Federal Environment Agency (Umweltbundesamt, UBA). For this project, we gathered and evaluated data on the quality assurance of air change rate measurements using tracer gas methods. In a first part, we conducted a comprehensive literature review, including the topics “air change rate measurement methods” and “health implications of applied tracer gases”. In a second part, we performed and analyzed measurements of air change rates. To that end, we employed two methods (concentration decay method, passive emission method) and six tracer gases (sulfur hexafluoride, carbon dioxide, nitrous oxide, hexafluorobenzene, perfluorotoluene, perfluordecalin) in controlled studies.

The literature review on tracer gas measurement methods for air change rates comprised 81 publications, including several review articles (Sherman 1980, Sherman 1989, Sherman 1990, Sherman 2014, Persily 1997, Persily 2016, Sundell 2006, Laussmann 2011, Mahyuddin 2012, Dols 1995). Some sources encompassed a general overview on potential applications of tracer gas methods, e.g. Persily 1997, Roulet 2002 and Raatschen 2002. Most publications dealt with well-established methods as described in current standards and guidelines, such as the concentration decay method (including the build-up method) and constant injection methods (with both active and passive injection and sampling). Some studies presented new approaches. However, it is important to note that these studies predominantly varied individual details in performance and analysis, while the basic measurement method remained unchanged. A majority of studies employed (one of) the two common tracer gases sulfur hexafluoride (SF_6) and/or carbon dioxide (CO_2) as well as one or more perfluorocarbon tracers (PFTs). To be more precise: 27 of the evaluated studies used SF_6, 29 CO_2 (with 20 of them metabolic or atmospheric CO_2), and 40 PFTs (with 9 of them hexafluorobenzene (HFB), and 4 of them perfluorotoluene (OFT)). The methods based on concentration measurements of metabolic or atmospheric CO_2, which were utilized or assessed in 20 of the evaluated studies, are currently not part of the German guideline VDI 4300 sheet 7.

In the publications, we observed a significant degree of variation in the level of detail given on methodological aspects and measurement techniques. In addition, the reporting of (measurement) uncertainties and other sources of error varied widely. Persily 2016 comes to the same conclusion in a comprehensive review article entitled “Field Measurement of Ventilation Rates“. Furthermore, standards and guidelines differ considerably in various countries, which means that respective regulations require varying degrees of depth regarding measurement details and procedures, quality assurance and error analysis (see chapter 2.1.1, VDI 4300 sheet 7, DIN EN ISO 16000-8, DIN EN ISO 12569, ASTM E741, ASTM D6245, Nordtest methods).

Other review articles and comparative studies also point out that standards and applied procedure are not entirely consistent (e.g. Dols 1995, Mahyuddin 2012, Sundell 2006): Dols 1995 reveals that, depending on which measurement method is used, different amounts of air interchange can be traced in the test results. Mahyuddin 2012 delineates the measurement strategies covered in literature and preferred by experts in the field. He draws attention to a remarkable fact: While all interviewed experts agreed on the importance of guidelines, less than half of them were actually aware that a guideline on the topic in question already existed (in this case ASTM D6245). The literature review of Sundell 2006 shows that very few studies are available which adequately document methodological details while at the same time providing data on the interrelation between ventilation parameters and health risks.

Because of different measurement strategies, varying depth of error analysis and missing standardized reference values, the reported measurement uncertainties and total errors for tracer gas methods vary widely in literature. This is found also for the methods and tracer gases we used in our study. Parameters that influence the measured air change rate and total errors of the results are, among others, the properties of the applied tracer gas, the employed measuring devices, active or passive injec-

tion/sampling of the applied tracer gas, the evaluation approach, the localization of injection and sampling positions, the mixing of tracer gas and indoor air, the structure of the emission sources (PFT), and the applicability of the single zone approach predominantly used.

For the concentration decay method using SF_6, both over- and underestimation of air change rates are reported to be in a range of -13 % to +16 % (see e.g. Chao 2004, Chao 2014). Bennett 2011 reports an error based on literature data of 20-30 %, Dietz 1982 a measurement uncertainty of 15 %, Dols 1995 an uncertainty of 10 % and Shaw 1984 an agreement between preset air change rates and measured values of 91 %. The variability of their data is specified by Almeida 2017 as ranging from 30 to 57 %, and by Howard-Reed 2002 as ranging from 27 to 50 %.

In our literature review, CO_2 is rarely used for decay measurements in the form of an actively injected tracer gas (with 8 of the 29 studies applying CO_2 methods). In addition, many studies employ widely available, simpler and less expensive IR sensors for detection of CO_2, whereas we predominantly used a photoacoustic monitor for our measurements. Given ideal test conditions and an application of the regression method for data analysis, Cui 2015 reports an error of 5 % for CO_2 decay measurements with a sensor or spectrometer. Additional errors occurred due to incorrect sampling position (up to 28%) or erroneous decay time (up to10 %). Sekhar 2014 describes an underestimation of air change rates of up to 27 % compared to SF_6 measurements. Shaw 1984 finds an agreement with preset air change rates of 101 %.

Only 7 of the evaluated studies applied N_2O as a tracer gas, 6 of which used the concentration decay method. Regarding accuracy, Grimsrud 1980 and Niemelä 1991 indicate deviations of 9 % and 2 % between N_2O and SF_6 for mean age of air or air change rate. Shaw 1984 finds an agreement with preset air change rates of 98 %.

Various studies in the evaluated literature deal with the accuracy of the PFT method. However, a majority of them refers to results using passive samplers, whereas we used active sampling in our study. Among the studies employing active sampling, Dietz 1982 reports an uncertainty of 15 %. Cheong 1995 finds an underestimation of 7 % for the air change rate applying active sampling vs. results gained from a direct-reading device. Bennett 2011 also states an underestimation of air change rates using active sampling methods. Krooß 1997, among others, draws attention to the variability of data from parallel measurements, which amounts to 9 %.

Regarding health implications, comprehensiveness and processing of scientific data for the employed tracer gases vary widely. While extensive data are available for SF_6, CO_2 and N_2O, only limited data could be found for the PFTs used in our study. In Germany, exposure limits (especially maximum workplace concentrations, MAK values) only exist for SF_6, CO_2 and N_2O. In this context, it is important to note that the short-term exposure limits (peak limits) referred to in the current version of VDI 4300 sheet 7 are no longer up to date and have to be revised.

All evaluated studies agree that high purity SF_6 has only low toxicological potential. Correspondingly, the German MAK value is rather high and well above the measuring range for typical air change rate measurements. Despite the high accuracy of SF_6 air change rate measurements (see, e.g., our data), an extensive use is not advisable due to its high global warming potential (GWP) of 22.800.

CO_2 is a substance endogenous to the human body and therefore, within given MAK values, assessed as safe. Furthermore, its GWP value, which is 1 per definition, is one of the lowest of all employed tracer gases. The main difficulties arising from the use of CO_2 as a tracer gas are of a technical nature, such as high background concentrations and cross-interferences of CO_2 measurement devices.

Although N_2O has been used as an anesthetic substance for a long time, its toxicological assessment varies significantly. While occupational exposure limits for SF_6 and CO_2 are similar in most countries, the German MAK value for N_2O is four times higher than the exposure limit recommended by the US

American National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). First and foremost, its reprotoxicological relevance is subject to controversy. Caution is advised when using N_2O measurement devices in air change rate measurements, since their range may lie, in some cases, above the MAK values. A high water solubility of N_2O and cross-interferences with some measuring devices cause additional issues concerning the use of N_2O as tracer gas. Furthermore, its GWP is 298 and thus considerably higher than the one for CO_2.

Owing to limited data availability, a general assessment of the PFTs employed was not feasible Although the chemical structure suggests the PFTs to be highly stable and chemically inert (which means no or negligible metabolism), there are indications of toxicological activity for some PFTs. Of the three PFTs applied in our study, Perfluordecalin (PFD) is used as a therapeutic substance, which is why at least some data is available on its health implications. In general, low toxicity is ascribed to PFD. However, in our data, PFD showed less reliable air change rates than other tracer gases. To make matters worse, PFD has a high GWP of >7500. In contrast, both of the unsaturated PFTs we used in our study produced more reliable results, and a first rough estimate of 1 for their GWP also favours HFB and OFT over PFD.

In the second part of our study, we measured air change rates in test chambers, as well as in a real office space adapted for our measuring requirements. The test chambers were made of glass and are routinely used for emission tests. Regarding air tightness, contamination status and accuracy of air flow, the test chambers are subject to the regular quality control of our accredited institute.

The office space was equipped with a decentralized ventilation unit including heat recovery and adjustable ventilation stages. At the beginning of the project, the air tightness of the room was checked by means of a blower door test and enhanced where necessary. Furthermore, three opening windows and the afore mentioned ventilation unit allowed us to realize the following measurement scenarios: ventilation stage “off” with a sealed ventilation unit; several controllable ventilation stages up to a theoretical air change rate of 0,95 h^{-1}; the state after 8 hours without ventilation; during ventilation with tilted windows; during intensive intermittent opening of the windows; as well as with windows permanently opened. The air change rates were measured using the tracer gases SF_6, CO_2 and N_2O in combination with the concentration decay method (detection via photoacoustic monitor and a CO_2 infrared sensor), as well as using HFB, OFT and PFD in combination with the PFT method (passive emission and active sampling followed by thermodesorption and gaschromatographic/mass spectrometric analysis (TD-GC/MS)).

In order to prepare the practical part of the study, a validation of the PFT analytical method was carried out for HFB, OFT and PFD. Several emission sources were tested regarding their constant emissions and their levels of emission rates. The validation was finally performed using standardized emission sources inspired by Shinohara 2010 (i.e. glass vials covered with a septum, plus an inserted injection needle as a diffusion tube). Emission rates were determined by weighing emission sources and correlating weight loss to elapsed time. Active sampling was performed via a dual channel membrane pump (BIVOC2) on sampling tubes filled with Tenax® TA and Carbopack™. The analysis was carried out via thermal desorption and subsequent gas chromatographic separation with mass spectrometric detection (TD-GC/MS). The air change rates were calculated from the measured analyte content, the volume of sampled air, the emission rate and the effective volume of the chamber or room. A comparison for HFB between TD-GC/MS results on the one hand and concentration measurements via photoacoustic monitor on the other hand, which had been planned initially, was abandoned since preliminary tests already revealed large discrepancies between the concentrations. In addition, the concentration displayed on the photoacoustic monitor was largely influenced by cross-interferences with SF_6, which was to be injected and measured parallelly for all further study scenarios.

The following parameters were validated: accuracy (recovery rate: spiked samples and chamber test), precision (repeatability: spiked samples and chamber test, laboratory precision), selectivity and speci-

ficity (selectivity: spiked samples, specificity: office room), linearity (spiked samples), limits of detection and determination (spiked samples), robustness (sample storage and chamber tests at different air change rates). Selectivity and specificity were verified for all three substances in two concentration ranges. The limits of detection were 0,06–0,09 µg/m³, the linear working range could be defined for all three substances between 2 and 650 µg/m³. The accuracy of the chamber tests was 85-91 %. Repeatability was found to be good, with relative standard deviations (RSD) below 5 %. For increasing air change rates, the variability of the data increased as well as indicated by higher RSD values, mainly owing to larger variation in PFD values. This effect is caused by very low emission rates for PFD and correspondingly low air concentrations with increasing air change rates. For such small concentrations, even small absolute variations can result in large relative standard deviations. Therefore, sufficiently high emission rates are to be provided by the chosen emission sources. As a consequence, other emission sources were evaluated and used for the measurements in the office space in order to ensure a sufficiently high air concentration of PFD. Additionally, the validation brought the following aspects to light, which have to be taken into account in future measurements: A sufficiently long time must be guaranteed for the PFT concentration to reach equilibrium and considerable care must be taken when preparing PFT standard solutions due to low solubility of some PFTs.

In order to evaluate the appropriate equilibration time for further measurements, a number of saturation curves were recorded in the test chamber and the office room. In the test chamber with 1 m³ volume and a preset air change rate of 1 h^{-1}, the equilibrium concentration for HFB, OFT and PFD was reached after about 2 hours. In the office space (in which all further measurements were planned to take place) the equilibration time was found to be about 2 hours (ventilation stage 4, air change rate 0,95 h^{-1}) and between 4 and 6 hours (ventilation stage 2, air change rate 0,50 h^{-1}).

Not only for the PFT method, but also for the concentration decay method, some parameters were evaluated separately before starting the planned measurement scenarios. Since, in our case, CO_2 concentrations were to be measured simultaneously with two devices, namely a photoacoustic monitor (model Innova 1312) and a simpler IR sensor (model Testo 435), we ran preliminary tests in order to compare the concentrations displayed on each device, as well as the air change rates calculated on their basis. Although the pure concentration values differed significantly, the air change rates calculated from the respective decay curves from both devices agreed better, with a mean deviation of <10 %. A second aspect to consider when using IR detection for CO_2 and N_2O were the cross-interferences mentioned above. Preliminary test results showed a strong cross-interference between CO_2 and N_2O when using the Innova 1312 with the software option “cross-interference correction” deactivated. Nevertheless, the air change rates calculated from the decay curves of CO_2 and N_2O agreed within 5 %, regardless of whether the other gas was injected simultaneously or not. Low deviations notwithstanding, all further measurements were carried out using the Innova´s automatic cross-interference correction in order to reliably prevent unwanted interferences. In additional pilot tests, sufficient mixing between indoor air and tracer gas within the office room was evaluated by taking samples from different locations. The intended procedure could be verified (i.e. injection of tracer gases while using a table fan until the Innova´s concentration display was constant). The air change rates were calculated via exponential regression of the decay curves, with the latest endpoint of regression being twice the background concentration. The range of exponential decay was determined optically in semi-logarithmic diagrams by defining its linearly displayed range. The correlation coefficients of the regression curves were used as additional indicators to help define the range. Differing from the provisions of VDI 4300 sheet 7, the CO_2 concentrations were used without background correction. In an exemplary analysis of two measurement scenarios, this leads to an underestimation of air change rates of up to 13 %. By applying the background correction with a fixed background value, the air change rates were overestimated by up to 26 % (for more details see 3.3.1 and 6.1). In order to minimize deviations, we decided to adhere to the analysis without background correction and complementarily increased the starting concentration of CO_2 to reduce background

effects. The decay time varied for all gases depending on the measurement scenario, whenever possible, 120 min were used.

The test phase was completed with validation tests for both methods and all six tracer gases in a 1 m^3 glass chamber with two different preset air change rates. The coefficient of variation per tracer gas was <10 % for all gases and both preset air change rates. These are the deviations from the preset air change rates for the decay method: <1 % for SF_6, <15 % for N_2O (underestimation), <20 % for CO_2 (underestimation with both devices). The results of the PFT method did not reflect a clear trend and the deviations were between +3 % and -19 %. The best agreement with preset values was observed for HFB (+3 % to -8 %).

As noted before, eight measurement scenarios were realized within the office room. Each of them was repeated five times. For five scenarios the windows remained closed and the air change rate was predominantly determined by infiltration (ventilation stage 0, with and without a sealed ventilation unit), or by the ventilation stage (ventilation stages 1, 3 and 4).

All measurements were performed in the previously described office room. The sampling interval for SF_6, CO_2 and N_2O with the Innova 1312 and the Testo 435 was set to 60 s during tracer gas decay. Both sampling devices were located at table height in the middle of the room. Similarly, the BIVOC2-pumps for active PFT sampling were located at a distance of about 2 m from the emission sources.

The emission sources were placed within the office room at least 8 hours before starting the measurements, usually overnight. The tracer gases used for the decay method were injected directly from gas cylinders or Teflon bags. To ensure sufficient mixing with the indoor air, a table fan was employed during the injection and the analysis was only started ten minutes after the injection was completed. PFT sampling was done before injection of other tracer gases for measurement scenarios ventilation stage 0, 1 and 3, as well as 8 hours unventilated. PFT sampling was done at the end of each decay experiment for measurement scenarios ventilation stage 4, with continuously opened windows, tilted windows and intensive intermittent window ventilation. The sampling time for the PFT was 10 min, the decay time depended on the scenarios and was up to 120 min.

In general, the variation of air change rates per tracer gas was high when air change rates were low (ventilation stage 0, 8 hours unventilated). RSD values were up to 12 % for SF_6, up to 20 % for N_2O and up to 12 % for CO_2. For the PFT method, RSD values were even higher: up to 31 % (HFB), 56 % (OFT), and 18 % (PFD). Deviations from SF_6 reference values were up to 16 % (N_2O), 10 % (CO_2), 19 % (CO_2 IR sensor), 19 % (HFB), 24 % (OFT), and 10 % (PFD).

For scenarios in which ventilation was determined mainly by the ventilation unit, the variability in data for the decay method was much smaller: RSD up to 5 % (SF_6), 13 % (N_2O), 5 % (CO_2), and 11 % (CO_2 IR sensor). In contrast, especially for PFD, the coefficient of variation was higher for the PFT method in these scenarios: max. RSD 13 % (HFB), 22 % (OFT), and 57 % (PFD). The deviation to expected air change rates (calculated from air volume flows of the ventilation unit) was small for SF_6 (between -7 % and +5 %). The results determined for the other gases of the decay method were found to be below the expected values (up to -24 % for N_2O, -21 % for CO_2 and -31 % for CO_2 IR sensor). Regarding the PFT method, not only the variation of results, but also the deviation from expected values was higher and did not show a clear trend. Deviations were observed within the range of -11 % to +36 % for HFB, -14 % to +1 % for OFT, and up to -41 % for PFD. Possible reasons of uncertainties in determining emission rates are: temperature effects, weighing errors and, for some emission sources, also direct air flows. Sink effects are not considered to play an important role, as for sink effects, a trend to overestimation of air change rates would be expected.

Overall, in our experiments with closed windows, the decay method produced the most reliable results, especially when using SF_6 as tracer gas. For SF_6, the maximum value for the mean deviation to expected values was 7 % (ventilation stage 4), the maximum RSD was 12 % (ventilation stage 0). For

CO_2 and N_2O detected by photoacoustic monitor, the maximum RSD was 20 % (N_2O ventilation stage 0) and the maximum of the mean deviations to SF_6 or expected values was 24 % (N_2O ventilation stage 1). Using the PFT method, RSD values are up to 57 % (PFD ventilation stage 1) and mean deviations to expected values are up to 41 % (PFD ventilation stage 1).

Derived from theoretical considerations, measurement scenarios with open windows should be more sensitive to disturbances by wind and temperature and exhibit a larger variability hence. However, in our results, the coefficients of variation were low for these measurements, with maximum values of 10% for the decay method and 23 % for the PFT method. In contrast, the deviations to SF_6 as a reference are high and all other tracer gases independent of the method result in mean air change rates below the SF_6 values. Within the gases applied with the decay method, a clear trend can be observed with air change rates for SF_6 > N_2O > CO_2 > CO_2 IR sensor. Mean air change rates for N_2O are found to be up to 16 % below SF_6 values, the underestimation for CO_2 is up to 31 % and for CO_2 IR sensor up to 57 %. Especially in these cases, the missing correction for outdoor air CO_2 levels may be a relevant source of error.

For the PFT method, no trend can be observed, the mean air change rates are found to be up to 69 % below SF_6 values.

Setting our data in context with theoretical considerations, it becomes clear that the PFT method is more suitable for long term measurements. Firstly, long term measurements will better compensate variations in emission rates. Secondly, for measurement scenarios with dynamic ventilation, it is uncertain if equilibrium concentrations can be achieved.

From our data, no correlation between air change rate and weather data can be observed. This is mainly due to determination of air change rates by the ventilation unit. In some measurement scenarios with the ventilation unit turned off, a weak correlation could be suspected. However, the number of data per scenario is too small for statistically relevant evaluations. We observed in our data a weak correlation between variability of results and the temperature difference between outdoor and indoor air. At least the highest RSD values (12-20 % decay method, 31-57 % PFT method) were observed when the temperature gradient varied strongly. At the same time, these are the measurement scenarios with the lowest expected air change rates and for low air change rates, even small absolute variations can result in large RSD values. As we cannot differentiate between these effects, no clear conclusion can be drawn from these observations.

Besides the already described tracer gases, in first tests, a solid material, Perfluoronaphthene (PFN) was used as emission source. Although the results from a chamber test were promising (5 samples, RSD 3 %, mean deviation to expected air change rate 14 %), they could not be reproduced in the office room. We performed two measurement series with ventilation stage 0. In both series, the RSD was sufficiently good (20 % / 6 %). However, the mean air change rates were 11-times / 10-times above the SF6 reference value. As we had to use very simple emission sources for PFN to reach acceptable emission rates, we observed a strong dependence of the emission rates on storage conditions, even with constant temperatures. This is a first indicator for a significant source of error. Nevertheless, further investigations are still subject to future work.

To conclude our findings, the literature review revealed that the conventional methods for determining air change rates, as described in VDI 4300 sheet 7, are still frequently used. In addition, the tracer gases employed in literature data correspond largely to tracer gases mentioned in the VDI guideline. Especially SF_6, CO_2 and PFTs are used frequently. When PFTs are used, often the tracer gases established by Dietz 1982 are employed. For CO_2, there is a significant effort observed to improve methods based on concentration measurements of metabolic or atmospheric CO_2. These methods are not yet covered in detail by VDI 4300 sheet 7.

For all tracer gases, it is necessary to assess their ecotoxicological potential and their health implications when used in a specific setup. In some details (peak limits), the MAK values given in VDI 4300 sheet 7 have to be revised. To reduce health implications, it could also be desirable to further evaluate methods with reduced need for tracer gases. Examples are methods based on atmospheric and metabolic gases or methods with very low limits of detection.

Based on the literature review and our data, it becomes clear that air change rate measurements can be subject to several sources of error and large uncertainties. While the common methods, like concentration decay and passive emission methods, correctly reflect the order and range of air change rates in all evaluated scenarios, the mean range of errors is still between 5 % and 50 %. Some authors in our literature review even estimate the uncertainty to a factor of 2 in typical field applications. Therefore, it is necessary for all measurements to define the information needed in detail, the parameters covered by the chosen method and to document the measurement precisely. The measurement record and report are of great importance in this context. Before starting a measurement series, questions on mixing, sampling position, zone approach, suitability of passive or active injection/sampling, as well as measurement intervals and duration should be clarified. In addition, weather and climatic conditions have to be documented. Especially for the decay method, a rapid mixing has to be ensured. Properties of the employed tracer gases such as cross-interferences, solubility, resulting accuracy and measuring range of applied devices, have to be considered. For the PFT method, the effective volume, the properties of the emission source, the equilibration time, the accuracy of the analytical method and evaluation approach, as well as gas specific properties such as sink effects, have to be taken into consideration. Similar considerations apply to other methods, such as the constant concentration method or direct volumetric measurements, for which specific parameters have to be evaluated before use. The existing guideline gives some indications on some of these issues. However, recommendations in more detail and depth are deemed useful in this context.

Our data support the results of the literature review regarding suitability of the different tracer gases and methods. If the limiting conditions of the methods were respected, all tracer gases resulted in sufficiently accurate air change rates. In our short term measurements, we observed the best agreement between preset air change rates and measured values for SF_6 and the decay method. In measurement setups which require large quantities of tracer gas or whenever an alternative is requested due to ecological or health implications, CO_2 can be used in spite of some limitations due to measurement issues. Based on the precautionary principle and the varying health assessments, N_2O should be avoided as a tracer gas. When taking into consideration the above mentioned aspects, long term measurements in occupied spaces can be performed by the PFT method with sufficient accuracy, although some parameters are not fully controllable in the field. Further investigations are necessary to establish new solid state PFTs like Perfluoronaphthene. In this context, especially the development of suitable emission sources and the evaluation of sink effects is needed. Overall, the question which tracer gas and method to use is thus dependent on the specific information required, the premises and the ventilation conditions on-site.

1 Einleitung

Bereits in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden erste Messungen zur Bestimmung von Luftwechselraten durchgeführt, da damit ein wichtiger Parameter in der Beschreibung von Innenraumluftqualität verfügbar wurde. In der Folge wurden weitere Methoden zur Messung von Luftwechselraten entwickelt und in den großen Industrienationen in entsprechenden Normen niedergelegt. Die aktuell gültige Richtlinie des VDI zur Messung von Luftwechselraten (vgl. VDI 4300 Blatt 7) stammt aus dem Jahr 2001. Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde in der vorliegenden Studie die Aktualität der Richtlinie durch eine ausführliche Literaturrecherche sowie Messungen unter kontrollierten Bedingungen evaluiert. Zudem wurden Daten zur gesundheitlichen Bewertung der eingesetzten Tracergase recherchiert und soweit möglich ausgewertet.

2 Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft

Die Literaturrecherche wurde in zwei Kategorien durchgeführt: In Abschnitt 2.1 finden sich die Ergebnisse zum Thema Bestimmung von Luftwechselraten in Innenräumen. In Kapitel 2.2 sind Daten zur gesundheitlichen Bewertung der eingesetzten Tracergase zusammengefasst.

Literatur zum Thema Bestimmungsmethoden wurde aufbauend auf der hauseigenen Arbeit Krooß 1997 sowie den neueren Review-Artikeln von Persily 2016 und Laussmann 2011 recherchiert. Die Recherche erfolgte im Zeitraum von Oktober 2016 bis Mai 2017. Wo sinnvoll, wurden Publikationen bis April 2018 ergänzt. Die berücksichtigten Literaturstellen sind in Tabelle 1 kurz in Hinblick auf Methode, Angaben zur Fehleranalyse und die verwendeten Tracergase zusammengefasst und im Text ausgewertet.

Um die gesundheitlichen Gefahren der eingesetzten Substanzen abzuschätzen, erfolgte eine umfangreiche Datenbankrecherche, die bei mangelnder Datenlage soweit möglich durch weitere Literatur ergänzt wurde. Grenz- und Richtwerte zu den einzelnen Tracergasen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Ein tabellarischer Vergleich zwischen Grenzwerten und Messbereichen der Tracergase findet sich in Tabelle 2.

Eine anwendungsbezogene Auswertung folgt in der Ergebnisdiskussion in Kapitel 6.

2.1 Literaturrecherche zum Thema Bestimmungsmethoden der Luftwechselrate in Innenräumen

2.1.1 Normative Literatur

Wie eingangs beschrieben wurde die Studie aufbauend auf den Vorgaben in VDI 4300 Blatt 7 durchgeführt. Ein Abgleich zwischen Ergebnissen der vorliegenden Arbeit und VDI 4300 Blatt 7 erfolgt in Abschnitt 6.3.

In Stichworten zusammengefasst beschreibt diese Richtlinie folgende Aspekte der Bestimmung von Luftwechselraten in Innenräumen im Ein-Zonen-Ansatz:

- Allgemeine Erläuterungen, Begriffsklärung und Anwendungsbereich
- Indikatorgase: Anforderungen und Wahl
- Probenahme
- Messplanung
- Konzentrations-Abklingmethode
- Konstant-Injektionsmethode (aktive Injektion aus Gasbehälter)
- Konstant-Injektionsmethode (passive Emission aus Diffusionsröhrchen)
- Anforderungen an das Messprotokoll

Neben der VDI-Richtlinie existiert eine DIN-Norm zur Bestimmung des lokalen Alters der Luft (vgl. DIN 16000-8), die auf der VDI-Richtlinie basiert. Diese ist detaillierter bzgl. möglicher Fehlerquellen, Anforderungen an die Auswertung, der Berechnung von Messunsicherheiten und den Anforderungen an die Dokumentation im Prüfbericht. Zudem beschreibt DIN 16000-8 den Multi-Zonen-Ansatz für Konzentrations-Abklingmethode und passive Emissionsmethode.

Für den Ein-Zonen-Ansatz sollte DIN 16000-8 mit DIN EN ISO 12569 übereinstimmen. Diese Norm beschreibt alle drei gängigen Tracergasmethoden (Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Inektionsmethode, Konstant-Konzentrationsmethode). Zudem sind viele Aspekte beschrieben, die in VDI 4300 Blatt 7 und DIN 16000-8 weniger Beachtung finden, wie etwa thermische Einflüsse, Auswirkungen von Auswertemethode und Abklingzeit auf die Genauigkeit, neuere Methoden mittels metabolischem CO_2 werden nur kurz als Variante der Konstant-Injektionsmethode erwähnt. DIN EN ISO 12569 ist die damit aktuellste deutsche Norm/Richtlinie zur Bestimmung von Luftwechselraten mittels Tracergasmethoden.

In der recherchierten Literatur (vgl. Abschnitt 2.1.2) werden folgende Normen und Richtlinien referenziert: ISO 12569 (Almeida 2017, Cui 2015, Okuyama 2012), ASTM E741-83 (Roulet 2002), ASTM E741-93 (Chao 2004, Nabinger 1994), ASTM E741-95 (Okuyama 2012, Persily 1997), ASTM E741-00 (Almeida 2017, Howard-Reed 2002, Lagus 2006, Laussmann 2011, Offermann 2009), ASTM E741-06 (Nabinger 2011), ASTM D6245-98 (Laussmann 2011), ASTM D6245-07 (Mahyuddin 2012), ASTM D6245-12 (Markov 2014), VDI 4300 Blatt 7 (Laussmann 2011), NT VVS118 (Bornehag 2005), JIS A 1406 (Okuyama 2012).

Diese Richtlinien (mit Ausnahme der japanischen Norm) und eine Handreichung des AIVC sind hier kurz zusammengefasst:

- Internationale Industrieguideline: Air exchange rate and airtightness measurement techniques: an applications guide. AIVC measurement techniques guide. Document AIC-AG-2-88 (Charlesworth 1988)
    - Handreichung zur Methodenwahl
    - Messmethoden für Luftwechselraten (Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Injektionsmethode, Konstant-Konzentrationsmethode) mit Anmerkungen zu Durchmischung, effektivem Volumen und Zonen-Ansatz sowie Berichtsformat
    - Messmethoden zur Luftdichtheit (Methoden unter Ausnutzung von Druckdifferenzen, Luftdichtheit von Gebäudeteilen, Berichtsformat)
    - Messgeräte und Materialien (Tracergase, Messgeräte für Tracergase, Geräte zum Aufbau von Druckunterschieden, Messgeräte für Klimadaten)
    - Übersicht über Normen und Richtlinien (Nordtest NT VVS 048, Nordtest NT Build 232, Swedish Standard SS 02 15 56, USA ASTM E741-83, weitere Normen für die Messung der Luftdichtheit)
    - Details zu Messmethoden und Durchführung (Abklingmethode mit verschiedenen Probenahme-Techniken, Konstant-Injektionsmethode mit passiver Probenahme (PFT), Konstant-Konzentrationsmethode, Abklingmethode mit mehreren Tracergasen, Druckdifferenzmethoden zur Messung der Luftdichtheit)
    - Details zu einzelnen Messgeräten (GC/ECD, IR, Manometer)
- USA: ASTM E741-00 reapproved 2006 „Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution"[1]
    - Konzentrations-Abklingmethode

[1] Die genannte Version ist bei Projektabschluss bereits überarbeitet worden. In der zitierten Literatur wird jedoch am häufigsten diese Vorgängerversion referenziert.

- Konstant-Injektionsmethode
- Konstant-Konzentrationsmethode
- Ausführliche Anweisungen zu Vorbereitung, Sammelverfahren, Vorgehen bei der Analytik, ergänzenden Messungen, Berichtsvorgaben, Berechnung der Messunsicherheit
- Nennung einer größeren Bandbreite an Indikatorgasen als in VDI 4300 Blatt 7
- Detaillierte Vorgaben zur Geräte-Kalibrierung

► USA: ASTM D6245-18: "Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation"
- Nutzen der CO_2-Innenraumluftkonzentration zur Evaluation der Innenraumluftqualität und Gebäudebelüftung
- CO_2-Produktion als Funktion von Körpergröße und physischer Aktivität
- Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Akzeptanz von Räumen hinsichtlich Körpergeruch
- LWR mittels metabolischem CO_2: Konstant-Injektionsmethode (GG) und Konzentrationsabklingmethode
- Kontinuierliche Messung von CO_2-Konzentrationen in Innen- und Außenluft als Mittel zur Beurteilung von Gebäudelüftung und Innenraumluftqualität

► Nordische Länder: Nordtest Methoden aufgeteilt nach Messmethoden:
- NT VVS 019, 1988-09, "Buildings - Ventilation Air: Local Mean Age" (Konzentrations-Abklingmethode, lokales Alter der Luft)
- NT VVS 047, 1985-11, "Buildings - Ventilating Air: Mean Age of Air"(Konzentrations-Abklingmethode, Alter der Luft gemittelt über den Messraum)
- NT VVS 048, 1986-02, "Buildings: Total Flow Rate of Air - Continuous Measurement" (Konstant-Konzentrationsmethode)
- NT VVS 055, 1987-06, "Buildings: Total Outdoor Air Inflow" (Konzentrations-Abklingmethode)
- NT VVS 074, 1989-05, "Total Ventilation Air Flow Rate: Continous Measurement - Constant Flow Technique" (Konstant-Injektionsmethode)
- NT VVS 105, 1994-11, "Ventilation: Flow Rate, Total Effective - By Single Zone Approximation" (PFT-Methode)
- NT VVS 114, 1997-05, "Indoor Air Quality: Measurement of CO_2" (Lüftungsindex bestimmt mittels metabolischem CO_2)
- NT VVS 118, 1997-11 „Ventilation: Local Mean Age of Air -Homogeneous Emission Techniques" (PFT-Methode, lokales Alter der Luft)

2.1.2 Wissenschaftliche Literatur

In die Literaturauswertung zum Thema Bestimmungsmethoden von Luftwechselraten in Innenräumen wurden 81 Referenzen mit einbezogen. Die Literaturstellen wurden in eine Datenbank eingepflegt, zusammengefasst und im Folgenden weiter evaluiert. Alle im Projekt verwendeten Tracergase bis auf Perflunafen (Perfluordecalin) sind in den Literaturstellen zu finden.

27 Studien bezogen sich auf SF_6-Messungen, 29 auf CO_2-Messungen und 40 auf Messungen mit der PFT-Methode. Bzgl. CO_2 überwiegen Tracergas-Anwendungen mit metabolischem oder atmosphärischem CO_2 (20 der 29 Referenzen). Für die PFT-Methode werden nicht in jedem Artikel die verwendeten Einzelsubstanzen genannt, explizit erwähnt sind folgende PFT: PMCH, PDCH, PDCB, PMCP, HFB, OFT und Perfluorhexan. N_2O wurde in der ausgewerteten Literatur selten als Tracergas eingesetzt (7 Referenzen). Weitere Tracergase, die eingesetzt wurden, sind: Freon (5 Studien), CH_4 (2 Studien) sowie C_2H_6, CO, und Helium (jeweils 1 Studie). Direktmessungen der Luftvolumenströme wurden in 5 Referenzen berichtet.

2.1.2.1 Review-Artikel

Die Literaturauswahl enthält mehrere umfassende Review-Artikel, die im Folgenden kurz zusammengefasst sind:

Sherman veröffentlichte mehrere Review-Artikel, die **Methoden zur Bestimmung der Infiltration mittels Tracergasen** beschreiben. In Sherman 1980, Sherman 1989 und Sherman 1990 werden zunächst die theoretischen Grundlagen und davon abgeleitet, die grundsätzlichen Auswertungs- und Anwendungsmöglichkeiten erläutert. Zu den praktischen Anwendungen werden die spezifische Methode im Sinne des Systemzustands und die generellen Auswertemöglichkeiten genannt (z. B. Konzentrations-Abklingmethode, Übergangsmethode, Auswertung mittels Regression-, Integral-, Zweipunktmethode). Beschrieben werden Methoden im Ein- und im Multi-Zonen-Ansatz. Zusätzlich werden der Aspekt Durchmischung und auch Modellrechnungen auf der Basis von Wetterdaten diskutiert.

Persily veröffentlichte 2016 eine Keynote zum Thema **Messung von Luftwechselraten** (Persily 2016). Darin beschreibt er unter anderem, dass wissenschaftliche Publikationen oft unzureichende Angaben zu Messmethode, Zeitskala, Messgeräten und Messgenauigkeit enthalten. Er erläutert Terminologie sowie Maßeinheiten und beschreibt drei grundsätzliche Methoden (Konzentrations-Abklingmethode verwendet seit den 1930er Jahren, Konstant-Injektionsmethode mit PFT seit den 1980er Jahren, Konstant-Konzentrationsmethode). Er verweist für dies Methoden auf ihre jeweilige Beschreibung in Normen im Ein-Zonen-Ansatz und nennt die grundsätzlichen Voraussetzungen hierfür: ausreichende Durchmischung (Variation der Tracergaskonzentration im Messbereich <10%), Konstanz der LWR während der Messung, je nach Methode Erreichen des Gleichgewichtszustands. Hingewiesen wird auch darauf, dass über den Ein-Zonen-Ansatz häufig keine wahren Außenluft-LWR bestimmt werden, da in vielen Fällen der Luftfluss aus angrenzenden Gebäudebereichen nicht vernachlässigt werden kann. Ausgehend hiervon werden Multi-Zonen-Ansätze, die ab den 1980er Jahren beschrieben wurden, erläutert. Hingewiesen wird auch auf den Einfluss von Wetterdaten als treibende Kräfte des Luftwechsels und die Notwendigkeit von Mehrfachmessungen.

Der Artikel von Sundell 2006 berichtet über einen **interdisziplinären Review der wissenschaftlichen Literatur zum Thema Luftwechsel und Gesundheit**. Von 365 zunächst recherchierten Literaturstellen waren letztlich nur 27 für das Thema nutzbar und methodisch von ausreichender Qualität. Die Literatur wurde von einem interdisziplinären Expertengremium bewertet und weiterer Forschungsbedarf abgeleitet. In diesem Zusammenhang weisen die Autoren darauf hin, dass zukünftige Studien die Luftwechselmessungen sorgsam dokumentieren sollten. Die Angaben sollten Methode, zeitlichen Ablauf, Ortsangaben und Auswertungsmethode umfassen.

Einen Übersichtsartikel zum Thema **Unsicherheiten bei Anwendung von Tracergas-Konstant-Injektionsmethoden mit Langzeitsammlung (PFT-Methode)** stellte Sherman 2014 vor. Darin findet sich ein Vergleich von theoretischer Fehlerabschätzung und in Feldstudien beobachteten Fehlern. Unter Idealbedingungen wird der Fehler der Methode auf 10-15 % geschätzt. Bei Anwendung durch geschultes Personal in realen Mess-Situationen wird ein Fehler von 20 % beobachtet (abgeleitet aus Daten von Lunden 2012). Für typische Feldanwendungen, die auch die Handhabung von Messgeräten durch ungeschulte Bewohner beinhalten, wird ein Faktor von 2 als Fehler für realistisch gehalten. Abschließend enthält der Artikel daher Hinweise wie die Unsicherheiten reduziert werden können.

Zur **Beurteilung der Innenraumluftqualität und von Lüftungseigenschaften mittels Innenraum-CO_2** veröffentlichte Persily 1997 einen Review-Artikel. Beschrieben werden darin Messgeräte sowie Voraussetzungen für die Anwendung von CO_2-Messungen für die genannte Fragestellung. Verwiesen wird dabei auf Normen oder Literaturstellen, die eine bestimmte Anwendung erläutern. Detailliert dargestellt werden folgende Anwendungen: Innenraum-CO_2 als Indikator für Körpergeruchsakzeptanzlevel, Bestimmung der Außenluftaufnahme an Lüftungsgeräten, Bestimmung von LWR mittels Konzentrations-Abklingmethode, Gleichgewichtsmethode und „Mass Balance Approach“.

Ergänzungen zu Anwendungsmöglichkeiten von Innenraum-CO_2-Messungen finden sich in Roulet 2002. Hier werden zusätzlich genannt: Berechnung der Luftdichtheit (aus LWR mittels CO_2, Volumen und Fläche der Gebäudehülle) sowie Berechnung der Anzahl an Nutzern aus dem CO_2-Konzentrationsverlauf.

Auch Laussmann 2011 bietet einen Überblick über LWR-Messungen mit metabolischem CO_2. Der Review-Artikel behandelt **Methoden und Ergebnisse sowie Bedeutung des Luftwechsels für die Innenraumluftqualität**. Neben einem methodischen Teil, der auf vorhandene Normen verweist, werden Vergleichsmessungen mit folgenden Methoden vorgestellt: Konzentrations-Abkling- und Build-Up-Methode mittels metabolischem CO_2, Konzentrations-Abklingmethode mit SF_6, PFT-Methode mit HFB als Tracergas. Die CO_2-Konzentrationen werden Hintergrund-korrigiert und stimmen dann gut, mit einer leichten Tendenz zur Überschätzung der LWR, mit den SF_6-Werten überein. Weitere Effekte, die bezogen auf die Messdaten evaluiert werden sind: Einfluss des Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenluft, Einfluss von Wind sowie Öffnungswinkel der Fenster. In Ergänzung zu den LWR-Messungen wurden weitere Innenraumparameter bestimmt und der Zusammenhang zwischen LWR und Schadstoffkonzentrationen im Innenraum untersucht. In diesen Daten finden sich CO_2-Konzentrationen bis nahezu 5.000 ppm in Schlafräumen, die auf unzureichende Luftqualität hinweisen.

Auch in Mahyuddin 2012 wird eine **Übersicht über Messmethoden für metabolisches CO_2 in der Forschung zum Thema Lüftungseigenschaften** bereitgestellt. Um kritische Parameter für die Messung von metabolischem und atmosphärischem CO_2 zu evaluieren wurden zum einen publizierte Studien ausgewertet. Zum anderen wurde eine Umfrage unter Innenraumluftexperten zu ihrer Einschätzung und ihrer persönlichen Mess-Strategie durchgeführt. Als kritische Parameter wurden identifiziert: Kenntnis der CO_2-Quellen (wo halten sich die Bewohner während der Messung auf), Kenntnis der Belüftungsvarianten vor Ort, Anzahl an Messpunkten (eine Mehrzahl misst in der Praxis nur an einer Stelle) und Höhe der Messpunkte (eine Mehrzahl der Experten und Studien wählt eine Messhöhe zwischen 1 m und 1,2 m), Position der Messpunkte im Raum (als güünstig eingeschätzt wird die Mitte des Raums und nahe an den Bewohnern). Die Expertenumfrage hat zudem ergeben, dass eine große Mehrzahl der Experten (92,5 %) Richtlinien für CO_2-Messungen in verschiedenen Gebäudetypen für nützlich halten würden. Die in den USA existierende Richtlinie ASTM D6245 war jedoch nur einem Drittel der Befragten (internationale Auswahl) bekannt (30,4 %).

Einen Überblick über **Anwendungsmöglichkeiten von Tracergasmethoden in der Gebäudetechnik** findet sich in Raatschen 2002. Beschrieben wird eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis wie etwa „Verfahren zur Volumenstrommessung, zur Bewertung von Lüftungsanlagen und Abzugshauben sowie zur Messung des Wiedereintritts von Ab- bzw. Fortluft ins Gebäude“. Ebenfalls vorgestellt werden „Tracergasverfahren zur Quantifizierung von Schadgastransportvorgängen in Gebäuden und die Beeinflussung der Raumluft durch belastende Außenluftzustände (Smogsituation, Schadgaswolke) durch den Temporary safe haven Test“.

Dols 1995 ergänzt mögliche Parameter, mit denen die Leistung von Lüftungsanlagen geprüft werden kann (Messung des Volumenstroms in Luftkanälen, prozentuale Außenluftaufnahme, Luftwechselrate, personenbezogener Außenluftvolumenstrom). Neben Tracergasmethoden werden hier auch direkte Messungen von Volumenströmen eingesetzt. Ein Vergleich von Ergebnissen der Tracergasmethode mit denen der Differenzdruckmethode findet sich z. B. auch in Kumar 1979.

2.1.2.2 Literaturdaten zu allgemeinen Voraussetzungen, Einflussfaktoren und Fehlerquellen

Die wesentlichen Voraussetzungen für Anwendung der konventionellen LWR-Messungen mittels Tracergas werden in vielen Artikeln benannt und diskutiert.

Konstanz der Luftwechselrate, Durchmischung und Zonen-Ansatz

Die Konstanz der LWR über den Messzeitraum wird etwa in Batterman 2017 und Bekö 2016 thematisiert. Batterman 2017 weist zudem darauf hin, dass Fluktuationen der Tracergas-Außenluftkonzentration die gemessenen LWR beeinflussen und eine adäquate Messzeit gewählt werden muss.

Eine ausreichende Durchmischung von Raumluft und Tracergas sowie eine entsprechend repräsentative Probenahme sind ebenfalls Grundvoraussetzungen für alle Tracergas-LWR-Methoden. Zum Thema Positionierung/Anzahl von Emissionsquellen und Dosiereinheit bei PFT- und Konstant-Konzentrationsmethode finden sich Hinweise bei Dietz 1982, Frederiksen 2011, Batterman 2017 und Bekö 2016. Eine mögliche Variante um repräsentative Proben zu erhalten ist auch die Probenahme an mehreren Orten ggf. auch mittels Schlauchsystem (z. B. Chuah 1997, Cui 2015). Auch Edouard 2016 zeigt, dass gemittelte Proben über einen langen Raum bessere Ergebnisse erzielen als mittige Einzelproben.

Einen Zusammenhang von Sonneneinstrahlung und Durchmischung aufgrund von Konvektion beschreibt McDowall 2014. Untersuchungen in der Prüfkammer zum Thema Durchmischung finden sich z. B. bei Laporthe 2001, die im Gegensatz dazu zeigten, dass in ihrem Messaufbau mit kalter Luft eine bessere Durchmischung erreicht wird als mit warmer.

Die berechnete Lüftungseffektivität in der Prüfkammer war für beide verwendeten Gase, SF_6 und N_2O, trotz Dichteunterschied bei Laporthe 2001 ähnlich. Vergleichbares berichtet Niemelä 1991, der feststellte, dass die Durchmischung für die Genauigkeit der LWR-Ergebnisse wichtiger ist als der Dichteunterschied beim Vergleich von SF_6, N_2O und Helium.

Bei hohen Luftwechselraten spielt das Thema Durchmischung eine besonders wichtige Rolle. Von van Buggenhout 2009 wird z. B. berichtet, dass der Probenahmeort die LWR bei Werten >9 h^{-1} signifikant beeinflusst. In der Studie von Walker 1995 zeigte sich, dass trotz Probenahme an mehreren Positionen die Durchmischung ab einer LWR von 20 h^{-1} nicht mehr für repräsentative Proben ausreichte.

Bei in Wohnhäusern gemessenen LWR wurde beobachtet, dass Lüftungssysteme die Durchmischung bei Anwendung der PFT-Methode verbessern können. Lunden 2012 fand, dass die Variabilität der Messergebnisse über mehrere Räume bei ausgeschalteter Lüftung mit <56 % deutlich höher lag als bei angeschalteter Lüftung (RSD <26 %). Die Autoren dieser Studie nutzten daher Volumen-gewichtete Mittelwerte zur Berechnung der LWR.

Mit dem Thema Durchmischung hängt auch die Frage nach dem geeigneten Zonen-Ansatz zusammen. Generell werden viele Studien im Ein-Zonen-Ansatz durchgeführt und ausgewertet (z. B. Almeida 2017, Batterman 2017, Bekö 2016, Bekö 2010, Chuah 1997, Frederiksen 2011, Lagus 2006). Mehrere Studien haben den Multi-Zonen-Ansatz gewählt, wobei unterschiedliche Varianten von Messmethoden und Auswertung zum Einsatz kamen (vgl. z. B. Mass Balance Approach bei Penman 1982 und Smith 1988, Konstant-Konzentrationsmethode Gustavsen 2011).

Auch für den Multi-Zonen-Ansatz gilt, dass die Luft innerhalb der Zonen vollständig durchmischt und je nach Methode im Gleichgewicht sein muss (Bjorling 2007, Chao 2014).

Howard-Reed 2002 hat sowohl den Ein- als auch den Multi-Zonen-Ansatz in ihrer Studie verwendet und weist darauf hin, dass bei Fensterlüftung in einem von mehreren Räumen der Zonen-Ansatz neu geprüft werden muss, da die Reichweite des Fenstereffekts limitiert ist. Diskutiert wird der Fehler

durch Anwendung des Ein-Zonen-Ansatzes mit Bezug zur Frage interzonaler Luftaustausch und Außenluft-LWR z. B. bei Bekö 2010, Persily 2016 und Wallace 2002.

Bei Einsatz der PFT-Methode berichten mehrere Artikel über den Einsatz des Multi-Zonen-Ansatzes, da sich hier mit wenig Aufwand mehrere Tracergase gleichzeitig ausbringen und messen lassen. Im Zwei-Zonen-Ansatz wurden z. B. Øie 1998, Stymne 1994, Lunden 2012 und van Ryswyk 2015 durchgeführt. Stymne 1994 berichtet dabei, dass aufgrund der typischen Luftströme in mehrgeschossigen Häusern der Fehler durch Verwenden des Ein-Zonen-Ansatzes für Quellen im Erdgeschoss kleiner ist als im Obergeschoss. Von Du 2012 wird berichtet, dass der interzonale Austausch die Luftwechselergebnisse besonders bei niedrigen LWR beeinflusst.

Einen Zwei-Zonen-Ansatz, für den nur ein Tracergas mit der PFT-Methode benötigt wird, stellt Iizuka 2010 vor. Als maximalen Fehler für diesen neuartigen Auswerte-Algorithmus wird 33 % abgeleitet.

Einen Auswertealgorithmus für die Verwendung des Multi-Zonen-Ansatzes mit der Konzentrations-Abklingmethode berichtet Miller 1997.

Penman erweitert seinen als „Mass Balance Approach“ bekannten Auswerteansatz für Messungen von metabolischem CO_2 1982 auf Multi-Zonen-Setups (Penman 1982). Der Ansatz basiert auf mehrdimensionaler Optimierung eines Systems von Differentialgleichungen, die über die Massenbilanzgleichung gekoppelt sind.

Ein weiterer möglicher Auswerteansatz für Messungen mit metabolischem CO_2 im Multi-Zonen-Ansatz findet sich in Hou 2015. Die Auswertung basiert auf der Annahme eines eindirektionalen interzonalen Luftflusses und Modellierung mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Auch in Fällen, in denen die Konzentrationsdifferenz zwischen den Zonen bei <10 % liegen (Grenzwert aus ASTM E741 für Anwendung des Ein-Zonen-Ansatzes), wichen berechneten LWR im Ein-Zonen-Modell um bis zu 30 % von Berechnungen im Multi-Zonen-Modell ab.

Von Bekö wird in mehreren Studien über die Fehler durch Anwendung des Ein-Zonen-Ansatzes für LWR-Messungen mittels metabolischem CO_2 berichtet. In Bekö 2011 und Bekö 2016 wird der relative Fehler der CO_2-Auswertung im Ein-Zonen-Ansatz mit bis zu 120 % angegeben. In den Vergleichsmessungen zwischen metabolischem CO_2 mit der Gleichgewichtsmethode und Freon Konstant-Konzentrationsmessungen wurden starke Abweichungen gefunden. Das Verhältnis der LWR-Ergebnisse von Einzelmessungen lag z. T. bei einem Wert von 11, im Mittel bei einem Faktor von 4, auch wenn die Trends übereinstimmen.

Methodenspezifische Aspekte

Einzelne Artikel adressieren spezifische methodische Aspekte, die hier nur kurz genannt werden sollen. Details finden sich in der Original-Literatur und in der Literatur-Datenbank, die für das Projekt erstellt wurde:

Dols 1995 benennt differenziert welche Größe mit den ausgewählten Methoden bestimmt wird. Roulet 2002 verwendet in diesem Zusammenhang die Begrifflichkeit „equivalent outdoor airflow rate” und definiert die Messung der Infiltration bei ausgeschalteter Lüftungsanlage vs. der Außenluft-LWR bei angeschalteter Lüftung. De Gids 2003 zeigt, dass in seinen Daten keine Korrelation zwischen Luftdichtheit und Abluftvolumenstrom mit den gemessenen LWR besteht, da das Nutzerverhalten die LWR bestimmt.

Eine ausführliche theoretische Arbeit zur Verbesserung der Datenanalyse bei Anwendung der Abklingmethode legt Okuyama 2012 vor. Hier werden auch praxisbezogene Vorgaben zur Berechnung der optimalen Abklingzeit gemacht. Auch Cui 2015 beschäftigt sich intensiv mit einer Analyse der Abklingmethode z. B. dem optimalen Startpunkt der Auswertung, optimalen Abklingzeit mit Referenz auf Okuyama 2012 und der Position der Mess-Sensoren.

Lagus 2006 gibt Hinweise zur statistischen Auswertung der Mess-Ergebnisse und erläutert die Vorteile einer Angabe von Konfidenzintervallen anstelle von Standardabweichungen, wenn nur wenig Messwerte vorliegen.

Äußere Einflussfaktoren (Temperaturgradient, Wind, Nutzerverhalten)

Eine Vielzahl von Studien bezieht den Einfluss äußerer Faktoren wie Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenluft, Windgeschwindigkeit oder Nutzerverhalten während der Messungen mit ein.

Bekö 2016, Pandian 1998, Wallace 2002 und Yamamoto 2010 beobachten LWR-Schwankungen aufgrund von Tages- und/oder Jahreszeit. Frederiksen 2011 beschreibt in diesem Zusammenhang, dass in dieser Studie die jahreszeitliche Schwankung der LWR im Monatsmittel kleiner ist als die Unterschiede zwischen einzelnen Gebäuden. Dennoch werden in Gustavsen 2011 die jahreszeitlichen Schwankungen als signifikant eingestuft.

Speziell den Einfluss durch die Windverhältnisse und Temperaturgradienten resp. Außenluft-Temperaturen berücksichtigen und diskutieren viele Autoren in ihren Veröffentlichungen. In unserer Literaturauswahl werden diese Themen unter anderen von folgenden Artikeln besprochen: Almeida 2017, Persily 2016, Wallace 2002, Nabinger 2011, Bekö 2010 (hier wird keine Zusammenhang gefunden, als Grund wird genannt, dass die Fenster geschlossen waren), Chao 1997, Dietz 1982, Howard-Reed 2002, Labat 2013, Laussmann 2011, McDowall 2014, Nabinger 2011, Nabinger 1994 (der Temperaturgradient bestimmt hier den Regelungsmechanismus der Lüftungsanlage und hat so indirekt Einfluss auf die LWR), Qi 2013, Walker 1995 (die LWR auf Dachböden wird hier vom Wind bestimmt, während der Luftaustausch zwischen Wohnung und Dachboden vom Temperaturgradienten abhängt), Wallace 2002 (Korrelation zu Temperaturgradienten beobachtet, keine Korrelation zu Wind), Wegner 1982a/b (Einfluss von Wind abhängig von Art der Fenster) sowie Øie 1998.

Einen deutlichen Einfluss des Lüftungsverhaltens der Bewohner beschreiben z. B. Bekö 2016 und de Gids 2003. Explizit wird das Thema Fensterlüftung in Chuah 1997, Howard-Reed 2002, Offermann 2009 und Wallace 2002 diskutiert. Unter anderem Howard-Reed 2002 und Laussmann 2011 diskutieren dabei auch den Einfluss von Öffnungsgrad resp. –winkel auf die LWR. Du 2012 bezieht weitere Aspekte des Nutzerverhaltens in seine Auswertung mit ein und diskutiert unter anderem Korrelationen zu Anzahl an Rauchern, Größe der Gebäude und Klimaanlage.

Aspekte von CO_2 als Tracergas

Die Anwendung von CO_2 als Tracergas ist unabhängig von der Methode vor allem mit der Schwierigkeit behaftet, dass die natürliche Hintergrundbelastung im Vergleich zum Messbereich hoch ist. Wird metabolisches CO_2 gemessen, muss zudem die Produktionsrate von CO_2 abgeschätzt werden, was eine zusätzliche Fehlerquelle in die Berechnungen einführt. In Ergänzung zu den Review-Artikeln von Persily 1997 und Laussmann 2011 werden im Folgenden einige weitere Hinweise aus anderen Literaturstellen zusammengefasst, die sich auf dieses Thema beziehen.

Batterman 2017 nennt Probleme, die sich durch CO_2-Konzentrationen in der Nähe des Hintergrundwertes ergeben. In Edouard 2016 wird beschrieben, dass eine Korrektur der Messwerte mit einem CO_2-Messwert, der mit einem anderen Gerätetyp gemessen wurde, problematisch sein kann. Bei Nutzung von metabolischem CO_2 berichtet Bekö 2010, dass auch die Anwesenheit von Personen in angrenzenden Räumen die CO_2-Konzentration beeinflusst und damit auch die Wahl des Ein-Zonen-Ansatzes geprüft werden sollte.

Die Produktion von metabolischem CO_2 ist von vielen Faktoren abhängig (vgl. z. B. Batterman 2017). Auch wenn einige Richtlinien Hinweise auf die Berechnung von CO_2-Produktionsraten enthalten (z. B. ASTM D6245), können diese nicht in allen Fällen angewandt werden. So berichtet z. B. Qi 2013, dass

die in westlichen Ländern abgeleiteten Berechnungen für die chinesischen Bewohner nicht anwendbar war. In Penman 1982 werden beispielhaft zwei Methoden zur Berechnung der Produktionsrate genannt, die auf verschiedene Mess-Szenarien abgestimmt wurden.

Eine Voraussetzung der häufig angewandten CO_2-Gleichgewichtsmethode besteht darin, dass die Belegung resp. die Produktionsrate der Messräume für den Messzeitraum konstant sein müsste bis der Gleichgewichtszustand erreicht wird und bestimmt werden kann (vgl. z. B. Batterman 2017). Aus diesem Grund wurde z. B. in Nabinger 1994 bei Messungen in Büroräumen kein ausreichendes Gleichgewicht erreicht, so dass die Methode in dieser Form hier nicht anwendbar war.

2.1.2.3 Literaturdaten zur Genauigkeit einzelner Methoden

Konzentrations-Abklingmethode

Die Konzentrations-Abklingmethode wurde in der ausgewählten Literatur häufig mit dem Tracergas SF_6 eingesetzt. Folgende Angaben zur Genauigkeit wurden dabei genannt:

Bzgl. der Streuung von Messwerten gemessen mit photoakustischem Monitor berichtet Almeida 2017 einen Variationskoeffizienten von 30-57 %. Howard-Reed 2002 berichtet ähnlich Werte für Detektion mittels photoakustischem Monitor und GC/ECD (27-50 %).

Chao 2014 hat Ergebnisse mit konventioneller Auswertung der SF_6-Abklingmethode (photoakustischer Monitor) verglichen mit Daten aus einer modifizierten Auswertung. Die neu vorgestellte Auswertungsroutine ermittelt die LWR mittels eines evolutionären Algorithmus für lange, schmale Räume (Flugzeugkabine). Aufgrund unzureichender Durchmischung unterschätzt die konventionelle Abklingmethode die Lüftungsrate um 13 % die neu vorgestellte Auswertung um 7 %.

Im Vergleich von SF_6-Abklingmethode mit SF_6-Konstant-Konzentrationsmethode (photoakustischer Monitor) überschätzt die Abklingmethode in einer Studie von Chao 2004 die LWR um 10-16 %.

In seiner Studie mit SF_6-Abklingmethode gibt Bennet 2011 einen Fehler aus Literaturangaben von 20-30 % an.

Mit automatisierten Gasinjektions- und Probenahmesystemen werden ähnliche Fehler berichtet:

Nabinger 1994 (GC/ECD), Dols 1995 (GC/ECD) und Nabinger 2011 geben eine Messunsicherheit von 5 % und einen Gesamtfehler für die LWR von 10 % an (Startkonzentration Nabinger 2011: 700 µg/m³, Nabinger 1994 150 ppb). Dietz 1982 benennt die Unsicherheit bei Verwendung des Brookhaven Continous Tracer Monitors (Start mit 85 ppm in Ausgabegemisch) mit ca. 15 %. Für Studien mit der SF_6-Abklingmethode und automatisierter GC/ECD-Detektion berichtet Wallace 2002 einen Gerätefehler von 2 %, einen Gesamtfehler in Abhängigkeit vom Integrationsintervall von bis zu 0,03 h^{-1} und einen zusätzlichen Fehler durch den Ein-Zonen-Ansatz von 10 %. Von Kumar 1979 (GC/ECD) werden etwas niedrigere Fehler berichtet mit einem Gerätefehler von 1,5 % und Abweichungen zur Differenzdruckmethode von 5 %.

Sowohl für SF_6 als auch für Freon ($CBrF_3$) ermittelte Miller 1997 unter Anwendung eines Zwei-Zonen/Zwei-Tracergase Auswertealgorithmus in Abklingversuchen eine Genauigkeit von 8 %.

In mehreren Studien wurden Vergleiche zwischen verschiedenen Gasen mit der Konzentrations-Abklingmethode angestellt.

So berichtet Niemelä 1991 von einem Vergleich der Gase SF_6, N_2O und Helium als Tracergase für Messungen der mittleren Verweilzeit von Luft. Dabei wurden folgende Quotienten gefunden: N_2O/SF_6 0,98; He/SF_6 0,96. Grimsrud 1980 berichtet, dass die SF_6-LWR (GC/ECD) ca. 10 % höher lagen als die N_2O-Resultate (IR). Shaw 1984 beschreibt dagegen, dass die LWR mit SF_6 (ECD) niedriger lagen als mit N_2O (IR), CO_2 (IR), CO (IR)und CH_4 (FID), zeigte jedoch auf, dass die Wahl des Säulentyps die SF_6-Werte

statistisch signifikant beeinflusste. Generell lag die Übereinstimmung für alle Gase mit voreingestellten Luftwechselraten bei >91 %.

Mit Roulet 2002 liegt eine Vergleichsstudie zwischen LWR mittels metabolischem CO_2 und der SF_6-Abklingmethode vor. Hier stimmten die Werte mit Abweichungen von 0,01–0,07 h^{-1} überein. In einer neueren Studie (Sekhar 2004) lagen die LWR mittels metabolischem CO_2 bis zu 27 % unter den SF_6-Werten (beide Gase mit photoakustischem Monitor gemessen).

Ausführlich diskutiert werden Auswertung und Fehlerquellen der CO_2-Abklingmethode in Cui 2015. Kaum Unterschiede wurden zwischen Messungen mit IR-Sensor und Spektrometer festgestellt. Der Fehler bei optimaler Position und Auswertezeit mit exponentieller Regression wird mit 5 % angegeben. Durch die Position des Sensors wurden Fehler bis 28 % beschrieben und durch nicht-optimale Auswerteintervalle Fehler bis 10 %. Auch van Buggenhout 2009 beschreibt Fehler durch falsche Wahl des Probenahmeorts in einem Prüfkammerversuch. Bei optimaler Messposition (in diesem Fall am Luftauslass) lag der Fehler unter 10 %, an besonders ungünstigen Stellen der Kammer bis 86 %.

Konstant-Konzentrationsmethode

Nur wenige Studien in unserer Literaturauswahl haben die experimentell aufwändige Konstant-Konzentrationsmethode beschrieben. Da diese sowohl in Richtlinien als auch in Review-Artikeln als genaueste Methode bezeichnet wird, wird sie gelegentlich als Referenzpunkt eingesetzt aber kaum Angaben zu ihrer Genauigkeit gemacht. Folgende Studien geben Hinweise auf die Genauigkeit der Konstant-Konzentrationsmethode: Walker 1995 beschreibt für einen Messaufbau mit SF_6 und Freon-Konstant-Konzentrationsmethode (IR, Zielkonzentration 5 ppm) einen Gesamtfehler von 6 %. Für Vergleichsmessungen mit der Differenzdruckmethode nennt Kumar 1979 eine Abweichung von 5 % und eine Messunsicherheit der Konstant-Konzentrationsmethode von 1,5 % im ppb-Bereich.

Chao 2014 weist darauf hin, dass für den Einsatz der Konstant-Konzentrationsmethode mit SF_6 und Detektion mittels photoakustischem Monitor eine große Menge an Gas notwendig ist. Chao 2004 beobachtete, dass je nach Aufteilung der Messräume eine lange Zeit benötigt wurde, um für die Zielkonzentration von 31,5 mg/m^3 ein Gleichgewicht zu erreichen (ebenfalls SF_6, photoakustischer Monitor).

Konstant-Injektionsmethode (aktive Injektion und passive Emission)

Als dritte Variante der konventionellen Tracergasmethoden zur Bestimmung von Luftwechselraten wird die Konstant-Injektionsmethode genannt. Diese wurde in der ausgewählten Literatur in verschiedenen Varianten mit allen im Projekt verwendeten Tracergasen eingesetzt. Die Zusammenfassung erfolgt unterteilt nach den Tracergasen, die eingesetzt wurden, da sich die Injektionsarten je nach Gas unterscheiden. Während für SF_6 und N_2O eine aktive Injektion von Tracergas erfolgte, wurde in den Studien, die CO_2 verwendet haben, häufig metabolisches oder atmosphärisches CO_2 ohne weitere aktive Zugabe ausgewertet. Für die PFT erfolgte die Injektion mittels passiver Emission aus Diffusions- oder Permeationsquellen.

Für die erste Kategorie der aktiven Tracergasausgabe von **SF_6 und N_2O** lagen nur wenige Studien vor, unter denen nicht alle Angaben zur Genauigkeit machten. Cheong 1995 berichtet für die SF_6-Konstant-Injektionsmethode (IR) LWR, die 3-9 % über Vergleichswerten aus PFT-Messungen mit aktiver Probenahme (TD-IR) liegen. Niemelä 1991 gibt die Übereinstimmung von mittleren Verweilzeiten der Luft zwischen N_2O und SF_6-Messungen mit 98 % an.

Einige Aspekte zur **CO_2-Gleichgewichtsmethode** unter Nutzung von metabolisch erzeugtem CO_2 wurden bereits in den vorigen Abschnitten diskutiert. Zur Genauigkeit berichtet Edouard 2016 einen Vergleich von Daten mit dieser Methode zu Messungen mit der SF_6-Konstant-Injektionsmethode. Je nach Detektionsmethode lagen die LWR-Ergebnisse 30-50 % (NDIR) resp. 10-12 % (photoakustischer

Monitor und Open Path Laser) unter den Werten der Konstant-Injektionsmethode. Berichtet wird dort auch, dass die Konzentrationsanzeige der beiden Messgeräte NDIR und photoakustischer Monitor um 13 % voneinander abweichen (Konzentrationsanzeige NDIR > Photoakustischer Monitor). Dols 1995 nutzte unter anderem direktanzeigende Messröhrchen für die Messung der CO_2-Konzentration und konnte mit dieser Detektionsmethode keine verlässlichen Daten für die Bewertung der prozentualen Außenluftaufnahme generieren.

Von Persily 2005 wird berichtet, dass die Messungen der personenbezogenen Außenluftrate mittels metabolischem CO_2-Gleichgewichtsmethode ca. 50 % unter den Direktmessungen in den Lüftungsanlagen liegen. Als mögliche Ursache wird angegeben, dass nicht überprüft wurde, ob die Voraussetzungen zur Anwendung der CO_2-Gleichgewichtsmethode wie z. B. konstante CO_2-Produktionsrate und Erreichen des Gleichgewichtszustands insgesamt eingehalten wurden.

Vergleiche zwischen CO_2-Gleichgewichtsmethode und SF_6-Abklingmethode haben in verschiedenen Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt. So berichtet z. B. Dols 1995 von CO_2-LWR-Raten, die über den SF_6-Werten liegen und Bennett 2011 von CO_2-Gleichgewichts-Werten unterhalb der SF_6-Werte.

Einige Literaturstellen stellen weitere **Varianten vor wie Messungen von metabolischem und atmosphärischem CO_2 als Mittel zur Bestimmung von Lüftungsparametern** verwendet werden können. In unserer ausgewählten Literatur werden folgende ergänzenden Ansätze zur Anwendung und Auswertung beschrieben:

Penman 1980 und Penman 1982 berichten einen Auswertungsansatz zur Auswertung der gemessenen CO_2-Konzentrationen in Innenräumen, der als „Mass Balance Approach“ oder „Transient Mass Balance Methode“ bekannt ist. Die Auswertung basiert auf der Optimierung eines Systems von Differentialgleichungen gekoppelt über die Massenbilanzgleichung bezogen auf den CO_2-Konzentrationsverlauf. Je nach Ansatz (Ein-Zonen-Ansatz: Penman 1980, Multi-Zonen-Ansatz: Penman 1982) variiert die Komplexität des Gleichungssystems. In Penman 1980 wird dabei ein Fehler von 14 % durch die Abschätzung der Produktionsrate in einem öffentlichen Gebäude mit wechselnder Besucheranzahl berichtet. Vergleichsmessungen zur SF_6-Abklingmethode nennt Penman 1982 mit einer Abweichung von ca. 15 % wobei die beiden Messungen nicht über die gleiche Zeitdauer ausgewertet wurden. Der Multi-Zonen-Ansatz des Mass Balance Approach wurde von Smith 1988 in einer Anwendung mit 4-Zonen-Setup evaluiert und ebenfalls mit Ergebnissen der SF_6-Abklingmethode verglichen. Hier zeigten sich in einzelnen Messungen Abweichungen, die auch auf die Verwendung des Ein-Zonen-Ansatzes für SF_6 zurückgeführt werden. Zudem werden hier Hinweise zur Fehlerminimierung des Mass Balance Approach diskutiert. Batterman 2017 stellt in seinem Artikel eine Erweiterung des Ansatzes vor und ergänzt Vergleichsmessungen mit verschiedenen konventionellen Methoden sowie weiteren Verbesserungsvorschlägen zu Build-Up-Methode und Berechnung der CO_2-Produktionsrate.

Markov 2014 stellt eine weitere Möglichkeit vor, den CO_2-Konzentrationsverlauf basierend auf der Massenbilanzgleichung, den Produktionsraten und den Luftströmen zu simulieren und daraus Lüftungsparameter abzuleiten.

Eine Variante zur Bestimmung der Luftwechselrate über den Tageszyklus von atmosphärischem CO_2 in Innen-und Außenluft stellt Carilho 2015 vor. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist ein vorübergehend nicht genutzter Innenraum, der keine CO_2-Quellen enthält. Als Vorteile der Methode werden genannt: Die CO_2-Konzentration der Außenluft wird nicht als Konstante angesetzt, die Methode ist breit anwendbar, da theoretisch jedes Gas verwendet werden kann, das einen typischen zeitlichen Tagesverlauf zeigt, es wird kein Tracergas injiziert, das Ergebnis ist unabhängig von der CO_2-Produktionsrate durch Bewohner, die Methode ist hochzeitauflösend und weniger anfällig für unvollständige Mischung. Erste Vergleichsmessungen zu Messungen mittels CO_2-Abklingmethode weisen Abweichungen von kleiner 10 % auf.

Um die Hintergrundproblematik zu umgehen, stellt Ohlsson 2017 eine Methode mittels ^{13}C-markiertem CO_2 vor. Als Detektionsmethode wird die Cavity-Ring-Down-Spektroskopie verwendet. Die Messunsicherheit wird mit 3 % angegeben, wenn die Konzentration an $^{13}CO_2$ über 4 ppm liegt.

Von den hier evaluierten Veröffentlichungen beziehen sich 40 auf Messungen mittels der **PFT-Methode**. Dabei wird das Tracergas mittels passiver Emission mit konstanter Rate aus Quellen verschiedener Geometrie freigesetzt. Die Detektion kann mittels aktiver oder passiver Probenahme durchgeführt werden. Nicht alle Studien berichten Details über die Emissionsquellen oder Sammelmedien, die eingesetzt wurden. Im Folgenden werden Literaturangaben zur Genauigkeit zusammengefasst soweit ausreichend Angaben verfügbar waren.

Von Sherman 2014 wird in einem Artikel zu Unsicherheiten in der Bestimmung von LWR mittels der PFT-Methode eine Gesamtunsicherheit von 10-15 % unter idealen Bedingungen berichtet. Aus einer kontrollierten Studie (Lunden 2012) wurden 20 % Gesamtunsicherheit evaluiert. Für typische Feldanwendungen, in denen auch ungeübte Personen (z. B. Bewohner) am Messablauf beteiligt sind, gehen die Autoren von einer Unsicherheit im Bereich von Faktor 2 aus.

Bzgl. der Variabilität ihrer Daten berichten mehrere Autoren ähnliche Ergebnisse: Andersen 1997 gibt eine Variabilität von 10-15 % an, Du 2002 nennt als Wiederholpräzision 11±12 % an und Hirsch 2000 berichtet einen Variationskoeffizienten aus Doppelbestimmungen von <11 %.

Aus Vergleichsmessungen und Literaturauswertung evaluierten mehrere Autoren Genauigkeitswerte für die PFT-Methode. Von Bekö 2011 werden Vergleichsmessungen zwischen PFT-Methode und Freon-Konstant-Konzentrationsmethode berichtet wobei die PFT-Werte inkonsistent waren. Ein erweiterter Vergleich der beiden Methoden wurde von Bekö 2016 vorgestellt. Hier lag die mittlere PFT-LWR um einen Faktor von 2,5 über der Freon-LWR. Da zugleich auf Literaturdaten von Sherman (hier nicht mit ausgewertet) verwiesen wird, die eine systematische Unterschätzung der LWR durch die PFT-Methode um bis zu 30 % begründen, werden als mögliche Ursachen für die Ergebnisse mangelnde Durchmischung oder Senkeneffekte angegeben. Verwiesen wird dabei auf Dorer (hier nicht ausgewertet), der aufgrund von Senkeneffekten einen Fehler von Faktor 1,2–2,2 beschreibt. Auch Frederiksen 2011 bezieht sich auf Literaturdaten von Bergsøe, Leaderer und Sherman und gibt eine Messunsicherheit von bis zu 20 % und eine Unterschätzung der Luftwechselrate um bis zu 20 % an. Ebenso auf Literaturdaten von Bergsøe bezieht sich Andersen 1997 und gibt die Präzision der Methode mit 10-15 % an.

Mehrere Studien berichten Ergebnisse die mittels PFT-Methode und Passivsammlung auf Aktivkohle als Adsorptionsmedium durchgeführt wurden. Bei Elution und Analyse von dotierten Proben mittels GC/ECD fand Mailahn 1987 eine Wiederfindungsrate von 70 %. Stymne 1994 gibt den technischen Fehler mit 11 %, den Fehler durch Verwendung des Ein-Zonen-Ansatzes für Quellen im Erdgeschoss mit 13 %, im Obergeschoss mit 38 % an. Die Gesamtunsicherheit liegt bei 90 % der Messungen unter 40 %, bei 50 % der Messungen unter 16 %. Ebenfalls bei Passivsammlung auf Aktivkohle berichtet Øie 1998 eine Variabilität von 8 % sowie einen Messfehler von 11 %.

Von Dietz 1982 wurde die Sammlung auf Kapillaradsorptionsröhrchen gefüllt mit Ambersorb (CATS) vorgestellt. Bei Analyse mittels TD-GC/ECD wurde hierfür eine Genauigkeit von ca.15 % angegeben. Die Variabilität der bestimmten LWR-Medianwerte bei Passivsammlung auf CATS gibt Offermann 2009 mit 19 % an. Auch Yamamoto 2010 berichtet einen Variationskoeffizienten von 18 % bezogen auf Doppelbestimmungen. Van Ryswyk 2015 berichtet eine Unterschätzung der LWR um ca. 16 % bei Vergleich von Ein- und Zwei-Zonen-Ansatz.

Tenax wurde als weiteres Sammelmedium für die PFT-Methode eingesetzt (Laussmann 2011 und Lunden 2012). Beide Arbeiten wurden bereits in vorangegangenen Abschnitten besprochen.

Für die aktive Sammlung der PFT findet sich bei Cheong 1995 und Krooß 1997 Chromosorb als Adsorptionsmedium. Cheong 1995 verglich die Ergebnisse mittels Adsorption auf Chromosorb und TD gekoppelt an einen photoakustischen Monitor mit Messungen mittels der Direktanzeige des photoakustischen Monitors. Die Proben, die gesammelt wurden, lagen dabei 5-7 % unter den Werten der Direktanzeige. Krooß 1997 analysierte die gesammelten Proben mittels GC/ECD und konnte aus Parallelmessungen einen RSD von 9 % ableiten.

Auch die Sammlung in Beuteln wurde angewendet und von Bennett 2011 beschrieben. Er findet mit diesem Ansatz eine Unterschätzung der LWR gegenüber der SF_6-Abklingmethode.

Ein wesentlicher Aspekt der PFT-Methode sind konstant emittierende **PFT-Emissionsquellen**. Nur wenige der evaluierten Studien gehen explizit auf den Aufbau der verwendeten Quellen ein. Folgende Artikel beschreiben diesen Aspekt oder zeigen Abbildungen der Quellen:

Bjorling 2007 zeigt eine Abbildung der anpassbaren Emissionsquellen, die in dieser Studie verwendet wurden.

Cheong 1995 setzte thermostatisierte Quellen ein, die aus einem beheizbaren Aluminiumblock mit wassergefülltem Bohrloch für ein Glasgefäß bestanden.

Dietz 1982 beschreibt Emissionsquellen aus einem Fluorelastomer in einer Metallhülse. Die Variabilität pro Quelle wird mit 11 % angegeben. Die Temperaturabhängigkeit liegt bei einem Temperaturanstieg von 20 auf 23 °C zwischen 5 und 15 % je nach Elastomer.

Krooß 1997 setzte einen Quellenaufbau ein wie er in VDI 4300 Blatt 7 beschrieben ist: Die Emissionsquelle besteht aus einem Glasröhrchen mit aufgestecktem Teflonschlauch als Permeationsmembran verschlossen mit einem Glasstopfen. Das Röhrchen wird in einer wassergefüllten Thermoskanne thermostatisiert.

Mailahn 1987 verwendete die bei Krooß 1997 beschriebene Quellengeometrie jedoch ohne Thermoskanne. Stattdessen wurde die Temperaturabhängigkeit bestimmt und die Emissionsraten entsprechend umgerechnet.

Lunden 2012 beschreibt den Einsatz von Emissionsquellen aufgebaut aus Glasvials mit Silikonseptum (tw. Teflon beschichtet) in einem Heizblock. Die Variabilität der Emissionsrate wird mit 4 % pro 1 °C Temperaturänderung angegeben. In der Anwendung werden 11 % Variabilität berichtet.

Øie 1998 setzte kapillare Emissionsquellen mit Silikonstopfen ein. In der Studie ergaben sich zunächst Fehler, da die Quellen ungünstig gelagert wurden und sich die Stopfen mit PFT anreicherten. Die Emissionsraten wurden daher sowohl bzgl. der Temperatur als auch bezogen auf die Anreicherung der PFT korrigiert.

Shinohara 2010 stellt einen Emissionsquellen-Typ vor, der aus zwei ineinander gestellten Rollrand-Vials mit Aluminium-Bördelkappen und Gummisepta aufgebaut ist. Durch die Septa wird eine Nadel mit Polyethylenfilter gestochen, um die Emission zu starten.

2.1.2.4 In der Literatur verwendete Tracergase und Messgeräte

Im Folgenden sind die Messgeräte aufgelistet, die in der ausgewerteten Literatur pro Tracergas verwendet wurden. Hierfür wurden nur diejenigen Literaturstellen evaluiert, in denen Messungen und Messergebnisse berichtet werden (d. h. keine Review-Artikel). In einigen Studien wurden die Geräte nicht detailliert beschrieben oder genannt, in diesen Fällen wurde soweit vorhanden die Bezeichnung übernommen, die die Autoren angeben (z. B. Monitoring-System):

- SF_6 Photoakustischer Monitor (Almeida 2017, Chao 2014, Chao 2004, Chuah 1997, Howard-Reed 2002, Laporthe 2001, Laussmann 2011, McDowall 2014, Sekhar 2004)
- SF_6 IR-Monitor und Stichproben mit Probenahme in Beuteln und GC/ECD-Analyse (Bennett 2011)
- SF_6 Sammelröhrchen aus Polytetrafluorethylen mit GC/ECD (Edouard 2016)
- SF_6 Polypropylen-Spritzen und GC (Lagus 2006)
- SF_6 IR-Analysator (Cheong 1995, Niemelä 1991, Penman 1982, Walker 1995)
- SF_6 automatisierte Probenahme mit GC/ECD (Dols 1995, Howard-Reed 2002, Kumar 1979, Miller 1997, Nabinger 1994, Wallace 2002)
- SF_6 GC/ECD (Grimsrud 1980, Shaw 1984)
- SF_6 automatisiertes Monitoring (Nabinger 2011)
- CO_2 Photoakustischer Monitor (Bekö 2010, Laussmann 2011, Sekhar 2004)
- CO_2 NDIR- / IR-Analysator (Batterman 2017, Bekö 2011, Bekö 2016, Carilho 2015, Bekö 2010, Bennett et al. 2011, Chao 1997, Cui 2015, Labat 2013, Laussmann 2011), Bekö 2010 korrigiert gegen Innova 1312, Cui 2015 abgeglichen mit NDIR-Spektrometer, Penman 1980, Penman 1982, Persily 2005, Shaw 1984, Smith 1988)
- CO_2 IR-Monitor automatisiert und mit Probenahme in Beuteln (Dols 1995)
- CO_2 NDIR, open path Laser und photoakustischer Monitor (Edouard 2016)
- CO_2 direktanzeigende Messröhrchen (Dols 1995)
- CO_2 Cavity-Ring-Down-Spektroskopie (Ohlsson 2017)
- Freon Photoakustischer Monitor (Bekö 2011, Bekö 2016, Gustavsen 2011)
- Freon IR-Analysator (Walker 1995)
- Freon GC/ECD (Miller 1997)
- PFT TD-GC/MS (Du 2012)
- PFT GC/ECD (Bjorling 2007 (Elution), Bennett 2011, Krooß 1997 (Elution), Mailahn 1987, Stymne 1994(Elution), Dietz 1982)
- PFT nach Dietz 1982 (Andersen 1997, Bekö 2011, Bekö 2016, Frederiksen 2011, Yamamoto 2010)
- PFT Analyse eingeschickt zu BNL (Lembrechts 2001, Offermann 2009, van Ryswyk 2015)
- PFT Photoakustischer Monitor (Cheong 1995)
- PFT keine Details (de Gids 2003, Laussmann 2011, Bornehag 2005, Hirsch 2000, McNeil 2012, Øie 1998, Parker 1986)
- N_2O Photoakustischer Monitor (Laporthe 2001)
- N_2O NDIR / IR-Analysator (Grimsrud 1980, Niemelä 1991, Salthammer 1994, Shaw 1984, Wegner 1982a/b)
- CO IR (Shaw 1984)
- CH_4 Flammenionisationsdetektor (Shaw 1984)
- CH_4, C_2H_6 IR-Analysator (Grimsrud 1980)
- Helium MS (Niemelä 1991)
- Direktmessung Volumenströme in Lüftungskanälen mit Anemometer, Staudrucksonden oder Differenzdruckmethode (Dols 1995, Kumar 1979, Lagus 2006, Leivo 2018, Persily 2005, Teijonsalo 1996)

Tabelle 1: Übersicht über wissenschaftliche Publikationen zum Thema „Bestimmungsmethoden der Luftwechselrate in Innenräumen“

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Almeida et al. 2017	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Photoakustischer Monitor (IR)					Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Variationskoeffizient bei 132 Messungen lag zwischen 30 und 57 %, Messzeit 30 Minuten; Leichte Korrelation zu Wind, Mehrfach-messungen empfohlen; ISO 12569 und ASTM E741-00 referenziert
Andersen et al. 1997				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) gem. Dietz 1982		PFT-Methode ohne Vergleichsmessungen; Ein-Zonen-Ansatz; Abschätzung der Präzision auf Basis von Literaturdaten: RSD 10-15 %; Unterschätzung des Lufteintritts durch PFT-Methode um ca. 15 %
Batterman 2017		Metabolisches CO_2 Konzentrations-Abkling-methode, Konstant-Injektions-methode (GG), Build-Up-Methode, Mass Balance				Review Artikel zur LWR-Bestimmung mit-tels metabolischem CO_2 mit Messreihe; Genauigkeit im Vergleich untereinander abgeschätzt, keine Zahlen wegen fehlender Referenzwerte; Ausführliche Erläuterung zu Methoden, Grundlagen, Anwendbarkeit und Fehler-quellen

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
		Approach				
		NDIR				
Bekö et al. 2010		Metabolisches CO_2				Anwendungsstudie; Detaillierte Diskussion zu Methode und Fehler; Ein-Zonen-Ansatz; Kalibrierung der IR-Sensoren gegen photo-akustischen Monitor (Innova 1312) und Bestimmung von Korrekturkurven; Fehlerabschätzung mittels Simulation von nominaler und wahrer LWR
		Build-Up-Methode, Konzentrations-Abkling-methode, Konstant-Injektions-methode (GG)				
		CARBOCAP ® (GMW22, NDIR)				
Bekö et al. 2011		Metabolisches CO_2		PMCH, PMCP	Freon	Vergleichende Studie bzgl. Tracergas und Methode; Ein-Zonen-Ansatz; Messungen metabolisches CO_2 (IR-Sensor) im Vergleich der Einzelmessungen Faktor 8,5 höher als Freon, bei Vergleich der Mittelwerte über alle Messungen 4-mal höher als Freon-Konstant-Konzentrationsmessungen; PFT tendenziell mit geringerer Abweichung zu Freon-Messungen, jedoch ohne Konsistenz;
		Konstant-Injektions-methode (GG)		Konstant-Injektions-methode (PFT)	Konstant-Konzentrations-methode	
		CARBOCAP ® (GMW22, (NDIR) 4-5 Nächte		gem. Dietz 1982, Ref. auf Frederiksen 2011 und Gustavsen 2011; Passivsammler 1 Monat	Photoakustischer Monitor (Innova 1312, IR) mit Dosiereinheit, Messzeit 4-5 Tage	

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Bekö et al. 2016		Metabolisches CO_2		PMCH, PMCP	Freon	Vergleichsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Medianwerte metabolisches CO_2 Faktor 2 über Median Freon, Trends stimmen überein; Medianwerte PFT-Vergleichsmessung Faktor 2,5 über Median Freon, keine Korrelation; Fehler gem. Literatur CO_2 bis 120 %, PFT mit Unterschätzung 30 %, bis Faktor 2 in Realsituationen, Senkeneffekte Faktor 1,2-2,2
		Konstant-Injektions-methode (GG)		Konstant-Injektions-methode (PFT)	Konstant-Konzentrations-methode	
		CARBOCAP ® (GMW22, (NDIR, Ref. Bekö 2010), Messzeit 2-4 Tage		Passivsammler über je einen Monat, eine Vergleichsmessung über 5 Tage, TD-GC (Ref. Frederiksen 2011)	Photoakustischer Monitor (Innova 1302, IR) mit Dosiereinheit, Messzeit 2-4 Tage	
Bennett et al. 2011	SF_6	Metabolisches CO_2		PFT		Anwendungsstudie mit Methodenvergleich; Keine explizite Angaben zu Zonen-Ansatz; Keine Angaben zu Emissionsquellen; Mittelwerte PFT 1,03 h^{-1} (STD 1,08), Abklingmethode 1,62 h^{-1} (STD 1,65), SF_6 als Referenz, Fehler Abklingmethode aus Literatur 20-30 %
	Konzentrations-Abklingmethode, Build-Up-Methode	Konstant-Injektions-methode (GG)		Konstant-Injektions-methode (PFT)		
	Kontinuierlich IR-Spektrometer (Miran SapphIRe ser. 250B; Stichproben GC/ECD)	NDIR-Monitor		Automatische Probenahme in Beutel, Analyse GC/ECD		
Bjorling et al.				HFB, OFT		Anwendungsstudie zur Evaluation des Mul-

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
2007				Konstant-Injektions-methode (PFT) Aktivkohleröhr-chen; Aktivsammlung; Elution GC/ECD		ti-Zonen-Ansatzes im Hinblick auf Schad-stofftransportwege und –emissionen; Multi-Zonen-Ansatz; Validierung steht noch aus; Emissionsquellen einstellbar
Bornehag et al. 2005				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) Passivsammler über 7 Tage, keine Details		Anwendungsstudie; LWR in 390 Gebäuden und Schlafräumen von Kindern; Emissionsquellen, Sammeladsorbens, Tra-cergas, Analytik und Anzahl Zonen nicht spezifiziert, Durchführung nach NT VVS 118; Keine Angaben zur Genauigkeit
Carillho et al. 2015		Atmosphäri-sches / metabo-lisches CO_2 Neue Methode und Konzentrations-Abklingmethode NDIR-Sensor (Extech SD800)				Methodenstudie, Vorstellung einer neuen Methode basierend auf dem CO_2-Tageszyklus und paralleler Messung des atmosphärischen CO_2 in Innen- und Außen-luft; Ein- und Multi-Zonen-Ansatz; Vergleichsmessung der neuen Methode mit Abklingmethode mittels metaboli-schem CO_2: Differenz der Mittelwerte klei-ner 10 %

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Chao et al. 2014	SF_6 Konstant-Konzentrations-methode, Konzentrations-Abklingmethode konventionell und evolutionärer Algorithmus Photoakustischer IR-Detektor (Innova 1412)					Vergleichsmessungen SF_6 zwischen Konstant-Konzentrationsmethode, konventioneller Konzentrations-Abklingmethode und einer modifizierten Konzentrations-Abklingmethode; Spezielles Setting: lange, schmale Räume (Flugzeugkabine) Multi-Zonen-Ansatz; Experimenteller Fehler zu Konstant-Konzentrationsmethode für konventionelle Abklingmethode 12-14 % (MW 13 %), modifizierte Abklingmethode 3-12 % (MW 7 %)
Chao et al. 1997		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode NDIR (Telaire-1050)				Anwendungsstudie mit Fokus auf Relation Innenraumluft-Radonkonzentration vs. Luftwechselrate; Keine Angaben zum Zonen-Ansatz; Keine Fehlerabschätzung, aktive Ausgabe CO_2, Aufnahme der Abklingkurve bis zur Hintergrund-Konz., Messgenauigkeit NDIR 5 % bis max. 2000 ppm; Einfluss Wind
Chao et al.		CO_2				Vergleichende Studie Abkling- vs. Konstant-

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
2004		Konstant-Konzentrations-methode, Konzentrations-Abklingmethode Photoakusti-scher IR-Detektor (Inno-va 1312)				Konzentrationsmethode; Ein-Zonen-Ansatz für Abklingmethode; Luftwechselraten mittels Abklingmethode konstant 10-16 % über Konstant-Konzentrationsmethode
Cheong & Riffat 1995	SF_6 Konstant-Injektions-methode IR-Analysator (BINOS)			Perfluorhexan Konstant-Injektions-methode (PFT) Aktive Proben-ahme auf Chromosorb 102, Photoakus-tischer Monitor (IR, Bruel&Kjaer 1302) direkt und nach TD		Vergleichende Studie; Ein-Zonen-Ansatz; Emissionsquelle PFT: beheizbarer Alumini-umblock mit wassergefülltem Bohrloch für Glasgefäß; Vergleich zwischen aktiver Probenahme PFT mit TD/IR vs. Direktanzeige IR vs. SF_6-Konstant-Injektionsmethode (IR): mit akti-ver Probenahme PFT ist LWR 5-7 % unter Direktanzeige PFT und 3-9 % unter SF_6-Konstant-Injektionsmethode
Chuah et al. 1997	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Photoakustischer Monitor (IR,					Anwendungsstudie; Nach Auswertegleichung Ein-Zonen-Ansatz; Keine Angaben zu Messgenauigkeit; LWR bei geschlossenen Fenster im Mittel 0,33 h^{-1}, bei Fenster auf Stellung ¼ 2,75 h^{-1}

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Bruel&Kjaer)					
Chung & Hsu 2001		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode CO_2-Sensor				Validierungsstudie Prüfkammer vs. CFD-Simulation, Fokus Lüftungseffektivität und LWR; Ein-Zonen-Ansatz; Einfluss der geometrischen Anordnung der Lüftungselemente beeinflusst Lüftungseffektivität stärker als Zuluftvolumenstrom, LWR von Geometrie weitgehend unabhängig; Lüftungseffektivität und LWR nicht korreliert
Cui et al. 2015		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode NDIR-Sensor und –Spektrometer				Validierungsstudie Prüfkammer zu Mess- und Auswertemethoden der Abklingmethode; Evaluiert wurden Einfluss von Sensorposition, Messgerät, Auswertezeit, Auswertung über exponentielle Regression oder Zweipunktmethode (Konz. Start-Ende); Einfluss Messgeräte gering; Fehler an optimaler Messposition bei optimaler Auswertezeit: ca. 5 % (expon. Regression), ca. 11 % (Zweipunktmethode) Fehler bei zu langer Auswertung an optimaler Messposition: bis 10 % (expon. Regression), bis 20 % (Zweipunktmethode) Fehler durch Sensorposition bis 28 %

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
de Gids 2003				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) Nicht angege-ben		Anwendungsstudie; Keine detaillierten Angaben zu Methode/ Emissionsquellen; Keine Fehlerabschätzung
Dietz & Cote 1982	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Brookhaven con-tinuous tracer monitor			PDCH Konstant-Injektions-methode (PFT) Probenahme aktiv: Brookhaven Atmospheric Tracer Sampler Probenahme passiv: Kapillar-röhren-Absorptions-Sammler mit XE-347 Ambersorb, TD-GC/ECD		Vergleichende Studie bzgl. Tracergas und Methode; Keine Angaben zu Zonen-Ansatz; Emissionsquelle PFT: Getränktes Fluorel-astomer in Metallhülse (Variationskoeffi-zient Emissionsraten 11%), Temperaturab-hängigkeit der Emissionsraten abhängig von Elastomertyp 5-25 % pro 3 Grad Er-wärmung; Gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse von aktiver und passiver Probenahme; PDCH und SF_6 zeigen gute Übereinstim-mung innerhalb der Genauigkeit (Repro-duzierbarkeit) der beiden Messsysteme (±15 %)
Dols & Per-sily 1995	SF_6	Metabolisches CO_2			Direkte Messung der Volumen-	Vergleichende Studie mit verschiedenen Methoden und Bestimmungsparametern

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Konzentrations-Abklingmethode, Konzentrations-bestimmung	Konstant-Injektions-methode (GG), Build-Up-Methode			ströme mittels Anemometer und Staudrucksonden	zur Performance von Lüftungsanlagen; Parameter: direkte Volumenströmen in der Lüftungsanlage, prozentuale Außenluftaufnahme, Außenluft-Luftwechselrate, Außenluftvolumenstrom pro Person; Unsicherheit Abklingmethode SF_6: 10 %, CO_2-GG-Methode 18 %; Je nach Methode unterschiedliche Faktoren im Ergebnis enthalten (z. B. Abklingmethode mit Infiltration, Direktmessung im Lüftungskanal ohne)
	Automatische Probenahme mit GC/ECD	IR-Monitor mit automatisierter Probenahme und Beutel; direktanzeigende Messröhrchen mit Handpumpe				
Du et al. 2012				HFB, OFT		Anwendungsstudie; Emissionsquelle nicht beschrieben; Multi-Zonen-Ansatz; Doppelbestimmung der PFT-Konzentrationen mit durchschnittlicher Wiederholungsgenauigkeit von 11 ± 12 %, Jahreszeitliche Schwankungen in den untersuchten Zonen abweichend; Korrelation zu Faktoren wie Anzahl Raucher, Größe, Klimaanlage wurde untersucht; Sicherung der Qualität durch Leerwertmessungen von Passivsammlern aus den Haushalten, Emissionsquellen wurden periodisch gewogen, um die Emissionsrate zu
				Konstant-Injektions-Methode (PFT)		
				Probenahme passiv 1 Woche; Analyse mittels TD, Kryoanreicherung und GC-MS		

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
						bestimmen, temperaturkorrigierte Sammler
Edouard et al. 2016	SF_6	Metabolisches CO_2				Anwendungsstudie mit Methodenvergleich; Keine Angaben zum Zonen-Ansatz; Vertikale und horizontale Probenahmestrategie liefert Hinweis auf Notwendigkeit gemittelter Messwerte in langen offenen Räumen; LWR CO_2 liegen 30-50 % (NDIR) resp. 10-12 % (Laser und Innova1312) unterhalb von SF_6-Werten; Probleme bei Auswertung CO_2 durch Produktionsraten und nicht ausreichend genaue Außenluft-CO_2-Konzentrationen;
	Konstant-Injektions-methode	Konstant-Injektions-methode (GG)				
	Probenahme auf PTFE Röhrchen, GC/ECD	NDIR-Sensor (SD-GAS-C25), open path Laser (GasFinder FC), photoakustischer Monitor (Innova 1312)				
Frederiksen et al. 2011				PMCH, PMCP		Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz mit mehreren Emissionsquellen in der Zone; Keine Details zu Emissionsquellen; Jahreszeitliche Schwankungen untersucht; Messunsicherheit bei optimaler Platzierung der Sammelröhrchen 20 %; systematische Unterschätzung der LWR durch PFT 15-20 %; CO_2-Konzentration in Schlafräumen bis 5.000 ppm
				Konstant-Injektions-methode (PFT)		
				Passive Probenahme über einen Monat gem. Ref. Dietz 1982, GC/ECD		

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Grimsrud et al. 1980	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode GC/ECD		N_2O Konzentrations-Abklingmethode IR		CH_4, C_2H_6 Konzentrations-Abklingmethode IR	Vergleichende Studie zwischen verschiedenen Tracergasen bei gleicher Methode; Keine Angaben zum Zonen-Ansatz; SF_6-LWR um 9 % über N_2O und 16 % über CH_4; Mögliche Ursachen: Detektionsgeräte und Messbereiche
Gustavsen et al. 2011					Freon Konstant-Konzentrations-methode Photoakustischer Monitor (Innova 1302, IR) mit Dosiereinheit, Messzeit 2-4 Tage	Anwendungsstudie; Multi-Zonen-Ansatz; Jahreszeitliche Schwankungen untersucht; Keine Details zur Genauigkeit
Hirsch et al. 2000				HFB Konstant-Injektions-methode (PFT) Passive Probenahme 7 Tage, keine weiteren Angaben zur Analytik		Anwendungsstudie; Einfluss energetischer Sanierung auf LWR, Anzahl Milbenallergene und Schimmelpilzsporen; Emissionsquellen, Sammeladsorbens, Analytik, Anzahl Zonen wurden nicht spezifiziert; Doppelbestimmung bei jeder zehnten Messung: Variationskoeffizient <11 %

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Hou et al. 2015		Metabolisches CO_2 Konzentrations-Abkling-methode, Build-Up-Methode, an-gepasste Multi-Zonen-Methode Kalibrierter CO_2-Sensor				Methodenstudie; Metabolisches CO_2 ausgewertet mit ver-schiedenen Methoden im Ein- und Multi-Zonen-Ansatz; Keine Angabe des Gerätetyps; Auswertung mit Ein- und Multi-Zonen-Ansatz unterscheidet sich um 30 % (0,32 vs. 0,41 h^{-1}) obwohl CO_2-Konzentrationen der verschiedenen Räume ähnlich (Diffe-renz <10 %)
Hou et al. 2017		Metabolisches CO_2 Build-Up-Methode k. A.				Anwendungsstudie; Metabolisches CO_2; Korrelation zu Luft-Schadstoffkonzentrationen untersucht; Keine Angaben zu Messgeräten, Zonen-Ansatz oder Genauigkeit
Howard-Reed et al. 2002	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Photoakustischer Monitor (B&K 1302); GC/ECD					Anwendungsstudie zum Einfluss von geöff-neten Fenstern auf LWR; Ein- und Multi-Zonen-Ansatz; Abweichungen zwischen gleichen Modellen des Monitors ca. 5 %, Abweichung Monitor zu GC/ECD ca. -3 %; RSD bei Messreihe geschlossenes Fenster 27-50 %; Bei Auswertung wurde Hintergrund-Konz. von Messwerten abgezogen;

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
						Einfluss Δ_T auf LWR bei geschlossenen Fenstern, bei offenen Fenster dominiert dieser Effekt in Abhängigkeit vom Öffnungsgrad
Iizuka et al. 2010				PFT		Theoretische Arbeit; Auswertungsmethode für PFT-Messungen mit einem Tracergas in Zwei-Zonen-Situationen; Maximaler Fehler 33 % Unterschätzung
Krooß et al. 1997				HFB Konstant-Injektions-methode (PFT) Sättigung über 3–4 Tage aktive Probennahme auf Chromosorb 102, Elution mit n-Pentan, Analyse mittels GC/ECD		Methodenstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Emissionsquelle: Glasröhrchen in Thermosbehälter mit Teflonschlauch als Permeationsmembran (vgl. VDI 4300 Blatt 7); Standardabweichungen durch Parallelmessungen bestimmt: maximal 9 %; Nachweisgrenze: 0,01 h^{-1}
Kumar et al.	SF_6				Differenzdruck-	Methodische Studie zur Vorstellung einer

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
1979	Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Konzentrations-methode GC/ECD				methode mit direkter Messung des Luftflusses in den Luftkanälen des Radialventila-tors	automatisierten Injektions- und Messein-heit; Validierung in Kammer und realen Mes-sungen; Unsicherheit Detektion 1,5 %, Genauigkeit beider Methoden im Vergleich untereinan-der max. Differenz 2 %, Genauigkeit im Vergleich zu Differenzdruckmethode beide Tracergasmethoden max. 5 % Abweichung
Labat et al. 2013		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode IR				Vergleichende Studie bzgl. LWR-Messung und numerische Modellierung in Hinblick auf Einfluss von Klimadaten; Einfluss durch Temperaturdifferenz innen-außen und Windgeschwindigkeit/-richtung werden diskutiert; Keine Details zu Messgeräten, Zonen-Ansatz, Genauigkeit der Messung
Lagus 2006	SF_6 Konstant-Injektions-methode (GG) GC nach Proben-ahme mit PP-Spritzen				Direktmessung der Frischluftzu-fuhr in den Lüf-tungskanälen	Review-Artikel mit ergänzenden Messun-gen; Tracergasmethode zur Bestimmung von ungewolltem Lufteinbruch in Kontrollräu-me; Ein-Zonen-Ansatz; Detaillierte Angaben zu Beiträgen zur Messunsicherheit, Angabe von Konfiden-zintervallen sinnvoll, Werte je nach Lüf-tungssystem bis zu 30 %

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Laporthe et al. 2001	SF_6 Konstant-Injektions-methode Photoakustischer Monitor (B&K 1302)		N_2O Konstant-Injektions-methode Photoakusti-scher Monitor (B&K 1302)			Validierungsstudie; Vergleich der Lüftungseffektivität bestimmt mit SF_6 und N_2O bei zwei Zuluft-Temperaturen; Mittlere Lüftungseffektivität beider Gase stimmt überein; Vorteile kalter Zuluft: höhere Luftge-schwindigkeiten am Kammerboden und weniger Schichtung
Laussmann & Helm 2011	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Photoakustischer IR-Detektor (B&K 1302)	Metabolisches CO_2 Konzentrations-Abkling-methode, Konstant-Injektions-methode (Build-Up) CO_2-Sonde (IR) mit Kontrollein-heit Testo 400; Photoakusti-scher IR-Detektor (B&K 1302)		HFB Konstant-Injektions-methode (PFT) Sättigung über 72 Stunden Probenahme aktiv (Balgpum-pe) auf Tenax , keine Angaben zu Analytik;		Review und vergleichende Studie bzgl. Tracergas und Methode; Ein-Zonen-Ansatz; Keine Details zur HFB-Quellengeometrie; Bei allen Auswertungen CO_2-Hintergrundkonzentrationen abgezogen; CO_2-Abklingmethode, Messraum 1: MW 0,32 h^{-1}, Konfidenzintervall 2-3 % CO_2- Build-Up-Methode, Messraum 1: MW 0,29 h^{-1}; Vergleich CO_2 (Abklingmethode) und HFB (PFT-Methode) zeigt gute Übereinstim-mung (Bsp. Messraum 3: CO_2 0,2-1,4 h^{-1}; HFB 0,2-1,7 h^{-1}); Vergleich CO_2 mit SF_6 (beide Abklingme-thode) in dieser Studie Quotient 1,02, mit Literaturdaten erweitert Quotient 1,06; Einfluss von Temperaturgradient innen-außen, Wind, Öffnungswinkel Fenster

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Leivo et al. 2018					Direkte Messung des Luftstroms am Lüftungsauslass mittels Anemometer	Anwendungsstudie zum Einfluss energetischer Sanierungen auf die Innenraumluftqualität; Auswertung der direkten Luftfluss-Messungen nicht in allen Fällen möglich; Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Belüftungsrate beobachtet
Lembrechts et al. 2001				PFT Konstant-Injektions-Methode (PFT) Passivsammler von BNL		Anwendungsstudie zu Einfluss von Luftdichtheit auf steigende Radonkonzentrationen; Vermutlich Multi-Zonen-Ansatz; Emissionsquellen und Passivsammler von BNL bezogen ohne weitere Angaben zu PFT und Analyse
Lunden et al. 2012				HFB, PMCH, PDCB, PDCH Konstant-Injektions-Methode (PFT) Passive Probenahme auf Tenax-Röhrchen TD-GC/MS; aktive Probenahme in PE-Beutel GC/ECD		Methodenstudie zur Anwendung der PFT-Methode; Emissionsquellen aus Glasvial mit Septum aus Silikon oder Silikon Teflon-beschichtet in Heizblock; Mittlere Volumen-gewichtete Konzentrationen aus verschiedenen Zonen verwendet: Auswertung bzgl. Unsicherheiten der Emissionsraten (8 % bei Temperaturschwankungen von +/-1 °C), unterschiedliche Tracergase mit unterschiedlicher Probenahme und Analytik, zeitliche und räumliche Variabilität der PFT-Konzentrationen (abhängig

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
						von Lüftung, bei angeschalteter Lüftung 12-26 %, ohne 20-56 %), Einfluss der Lüftungsbedingungen (HVAC)
Mahyuddin et al. 2012		Metabolisches CO_2 n. a. n. a.				Review-Artikel; Einflussfaktoren in der Bestimmung von metabolisch generierten CO_2-Konzentrationen; Wichtigste Faktoren: Lokalisierung, Höhe und Anzahl der Messpunkte sowie Kenntnis über Bewohner und Lüftungsanlage
Mailahn et al. 1989				HFB Konstant-Injektions-methode (PFT) Passive Probenahme 1 oder 2 Wochen auf OVM-3500, Aktivkohle-Pad Elution mit CS_2 Analyse mittels GC/ECD		Methodenstudie; Anwendung PFT-Methode mit HFB; Emissionsquellen: Glasröhrchen mit Teflonschlauch als Permeationsmembran (Grundlage für Krooß 1997 und VDI 4300 Blatt 7); Wiederfindung dotierter Proben 70 %, Nachweisgrenze 1,5 µg/m^3 bei 2 Wochen Sammelzeit; Probenahmeposition ca. 2,5 m von Quellen entfernt
Markov & Melikov 2014		Metabolisches CO_2 n. a.				Theoretische Arbeit zur Auswertung von metabolischem CO_2; Neue Ansätze zur Auswertung metabolischer CO_2-Konzentrationen durch Vergleich

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
		n. a.				mit simulierten Daten
McDowall & Plagmann 2014	SF_6 Konstant-Injektions-methode (GG) Photoakustischer Monitor (Innova 1412)					Methodische Studie zur Durchmischung; Zwei Zonen jeweils im Ein-Zonen-Ansatz; Durchmischung ohne unterstützende Maßnahmen vertikal gut, horizontal abhängig von Sonneneinstrahlung/Konvektion
McNeil et al. 2012				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) Passivsammler Aktivkohle 3-4 Wochen, Analyse nicht angegeben		Anwendungsstudie zu Luftdichtheit und Luftwechsel in neueren Gebäuden; Ausbringen PFT in mehreren Zonen; Tracergas, Emissionsquellen, Analytik nicht näher beschrieben; Fensterlüftung und Einstellung der mechanischen Belüftung nicht ausreichend
Miller et al. 1997	SF_6 Konzentrations-				Freon ($CBrF_3$) Konzentrations-	Methoden-/Validierungsstudie; Vorstellung einer Auswertemethode für Messungen im Zwei-Zonen-Ansatz mit zwei Tracergasen (Abklingmethode);

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Abklingmethode				Abklingmethode	Genauigkeit im Vergleich zur eingestellten LWR im Testhaus 8 %
	GC/ECD Probenahme mit Norprene-Schlauchsystem				GC/ECD Probenahme mit Norprene-Schlauchsystem	
Nabinger et al. 1994	SF_6	Metabolisches CO_2				Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz für jedes Segment, Volumen-gewichteter MW für Gebäude-LWR berechnet; Messunsicherheit Monitoringsystem 5 %, Genauigkeit LWR 10 %, Startkonzentration ca. 150 ppb; Korrelation Temperaturgradient – LWR bestimmt durch Regelungsvorgaben der HVAC; CO_2-Konzentration schlechter Indikator für LWR
	Konzentrations-Abklingmethode	Konzentrationsmessung				
	Automatische Probenahme mit GC/ECD	IR-Monitor				
Nabinger & Persily 2011	SF_6					Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz (ASTM E741); Messunsicherheit Monitoringsystem 5 %, Genauigkeit LWR 10 %, Startkonzentration ca. 700 µg/m^3; Einfluss des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit abhängig von Lüftungsart
	Konzentrations-Abklingmethode					
	Automatisiertes Ausgabe- und Monitoring-system (keine weiteren Angaben)					

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Niemelä et al. 1991	SF_6 Konstant-Injektions-methode (Build-Up); Konzentrations-Abklingmethode IR-Analysator (BINOS)		N_2O Konstant-Injektions-methode (Build-Up); Konzentrations-Abklingmethode IR-Analysator (BINOS)		He Konstant-Injektions-methode (Build-Up); Konzentrations-Abklingmethode Portables Mas-senspektrometer	Vergleichende Studie bzgl. Tracergas und Methode (mittleres lokales Alter der Luft); Ein-Zonen-Ansatz; Verschiedene Varianten der Injektion un-tersucht; SF_6 als Referenz verwendet, alle Gase mit Konstant-Injektions- und Konzentrations-Abklingmethode gemessen; gute Übereinstimmung, wenn die Durchmi-schung der Gase sichergestellt wird (Über-einstimmung SF_6 und N_2O 98 %); Nullpunktdrift des IR-Analysators beobach-tet
Offermann 2009				PMCH Konstant-Injektions-methode (PFT) Passivsammler Kapillarröhren-Absorptions-Sammler mit XE-347 Ambersorb, Sammeldauer 24 Stunden / 2 Wochen		Survey zu Lüftungsparametern und Innen-raumluftqualität; Ein-Zonen-Ansatz (ASTM E741); Quellengeometrie und Analytik nicht spezi-fiziert (Bezug über BNL); Qualitätssicherung über Blank-Proben, Doppelproben und einzelne Messungen in zwei Zonen; 24h und 2 Wochen-LWR stimmen im Me-dian gut überein, im direkten Vergleich liegen die Abweichungen zwischen 1 und 110 %

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Ohlsson et al. 2017		$^{13}CO_2$ n. a. Cavity-Ring-Down-Spektroskopie				Methodenstudie; Isotopenmarkiertes CO_2 um Probleme mit Hintergrundkonzentrationen zu umgehen; Messunsicherheit 3 % wenn Konzentration $^{13}CO_2$ größer 4 ppm
Øie et al. 1998				Vermutlich HFB, OFT (Ref. Stymne 1994) Konstant-Injektions-methode (PFT) Probenahme passiv, 14 Tage auf Aktivkohle Adsorbens		Anwendungsstudie; Ein- und Zwei-Zonen-Ansatz; Kapillare Emissionsquellen verschlossen mit Silikonstopfen, temperaturkorrigiert, keine Details zur Analytik; Experimenteller Aufbau wie Stymne 1994, daher vermutlich HFB und OFT; Technischer Fehler der Methode 11 %, zusätzlich Blind Blanks analysiert; Systematischer Fehler in ersten Ergebnissen durch PFT-angereicherte Silikonstopfen; exp. Korrekturfaktor 1,56; Statistisch signifikante Korrelation zwischen LWR und Außentemperatur
Okuyama & Onishi 2012	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Theoretische Arbeit zur Verbesserung der Datenanalyse (Abklingmethode); u.a. Methode um optimale Abklingzeit in Abhängigkeit von Anzahl Datenpunkten zu bestimmen

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Pandian et al. 1998				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) n. a.		Review-Artikel mit statistischer Auswertung von ca. 3.000 PFT-LWR in den USA; Auswertung bzgl. geografischer Lage und Jahreszeit
Parker 1986				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) Aktive Probenahme automatisiert auf Ambersorbröhrchen (Gilian PATS)		Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Tracer, Emissionsquellen, Analytik nicht spezifiziert; Automatisierte Probenahme alle 8 Stunden über 5-6 Tage; Auswertung LWR tagesbezogen und gemittelt über alle Messdaten; Daten reichen nicht für Auswertung bzgl. treibender natürlicher Kräfte aus
Penman 1980		Metabolisches CO_2 Mass Balance Approach IR-Analysator				Anwendungsstudie und Auswertemethode mittels zweidimensionaler Optimierung bezogen auf Konzentrationsverlauf; Ein-Zonen-Ansatz; Hintergrundkonzentration 340 ppm; Fehler in der Abschätzung der CO_2-Produktionsrate nach Optimierung der Variablen LWR und Produktionsrate 14 %
Penman & Rashid 1982	SF_6	Metabolisches CO_2				Anwendungsstudie und Auswertemethode mittels System von Differentialgleichungen

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Konzentrations-Abklingmethode IR-Analysator	Mass Balance Approach IR-Analysator				bzeogen auf Luftflüsse aus angrenzenden Zonen; Multi-Zonen-Ansatz; Hintergrundkonzentration 340 ppm; Vergleich CO_2-Auswertung zu SF_6-Abklingmethode: Abweichung <0,1 h^{-1}
Persily 1997		Metabolisches CO_2 Konzentrations-Abkling-methode, Konstant-Injektions-methode (GG), Mass Balance Approach n. a.				Review-Artikel zur Beurteilung der Innen-raumluftqualität sowie Lüftungseigenschaf-ten mittels metabolischem CO_2; Beschrieben wird Abschätzung der Körper-geruchsakzeptanz mittels CO_2-Konzentration; Luftwechselraten mittels Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Injektionsmethode (GG), Mass Balance Approach; Außenluftaufnahme am Lüf-tungsgerät mittels CO_2-Konzentration; Ausführliche Beschreibung von Voraussetz-ungen, Faktoren, die berücksichtigt wer-den müssen, sowie anwendbaren Normen
Persily et al. 2005		Metabolisches CO_2 Konstant-Injektions-methode (GG), Außenluftanteil durch Diffe-renzbildung in			Volumetrische Direktmessung in den Kanälen der Lüftungsanlage	Vergleichende Studie; Personenbezogene Außenluftraten: CO_2-GG-Methode vs. volumetrische Direktmes-sungen und Berechnungen über das CO_2-Konzentrationsverhältnis zwischen Luft-strömen in der Lüftungsanlage; Ergebnisse der CO_2-GG-Methode deutlich unter den anderen Methoden (im Mittel

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
		den Lüftungskanälen				Faktor 2)
		IR-Monitor				
Persily 2016	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Review-Artikel; Überblick über notwendige Qualitätskriterien bei Messung von LWR, Begriffsdefinitionen, Maßeinheiten, Methoden und einzelne grundlegende Studien zu LWR
Qi et al. 2013	Metabolisches CO_2	SF_6				Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Durchmischung wurde geprüft, Produktionsrate CO_2 für chinesische Studentinnen kann nicht mit westlicher Standardformel berechnet werden; Vergleich SF_6-Abkling und CO_2-Methode: relative Differenz <10 % (nicht alle methodischen Details klar)
	Konstant-Injektions-methode (GG)	Konzentrations-Abklingmethode				
	Sensor	k. A.				
Raatschen 2002	SF_6			PFT		Review-Artikel; Überblick über Anwendungsmöglichkeiten von Tracergasmethoden in der Gebäudetechnik; Schwerpunkt Analyse mittels GC/ECD;
	Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Konzentrations-methode, andere Anwendungen			Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Konzentrationsmethode, andere Anwendungen		
	Probenahme			Probenahme		

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Spritzen/Beutel oder online, Analyse GC/ECD			Spritzen/Beutel oder online, Analyse GC/ECD		
Roulet & Foradini 2002	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode Analysator	Metabolisches CO_2 Konzentrations-Abklingmethode Analysator				Vergleichende Studie / Methodenstudie; Manuelle und automatische Auswertung von CO_2-Konzentrationsverläufen bzgl. Abklingphasen; Ein-Zonen-Ansatz mit Begrifflichkeit „equivalent outdoor airflow rate“; Normalisierte CO_2-Konzentrationen verwendet; Neben Luftwechsel auch Berechnung der Luftdichtheit aus LWR und Anzahl der Nutzer aus Konzentrationsverlauf; Vergleich SF_6 zu CO_2-Abklingmethode: Differenz 0,01-0,07 h^{-1}
Salthammer 1994			N_2O Konzentrations-Abklingmethode NDIR			Anwendungsstudie; Startkonzentration 200 ppm; Kein methodischer Fehler angegeben, mittlere LWR aus 150 Messungen 0,36 h^{-1}; Berechnungsgrundlagen für Luftkonzentrationen bei konstanter und exponentiell abnehmender Schadstoffemission beschrieben
Sekhar 2004	SF_6 Konzentrations-	Metabolisches CO_2 Konzentrations-				Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; CO_2-Hintergrundkonzentration 400 ppm,

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
	Abklingmethode	Abklingmethode				Anstieg durch Personen im Messraum bis auf 2.900 ppm; Vergleich der Luftwechselraten mit metabolischem CO_2 und SF_6: CO_2-Werte bis zu 27 % niedriger als SF_6
	Photoakustischer IR-Detektor	Photoakustischer IR-Detektor				
Shaw 1984	SF_6	CO_2	N_2O		CH_4, CO	Vergleichende Studie / Validierungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Gemessene Luftwechselrate vs. durch Abluftventilator eingestellte LWR: Korrelation für alle Gase >0,91; für SF_6: Säulentyp entscheidend
	Konzentrations-Abklingmethode	Konzentrations-Abklingmethode	Konzentrations-Abklingmethode		Konzentrations-Abklingmethode	
	ECD (zwei Säulentypen)	IR	IR		FID (CH_4) IR (CO)	
Sherman et al. 1980	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Theoretischer Methoden-Review; Methoden zur Messung der Luft-Infiltration; Ein- und Multi-Zonen-Ansatz; Theoretische Grundlagen, Ableitung der Auswertegleichungen und Anwendung (inkl. Exkurs zu Durchmischung und Modellableitung aus Wetterdaten)
Sherman 1989	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Theoretischer Methoden-Review; Methoden zur Messung der Luft-Infiltration, Update zu Sherman 1980; Ein- und Multi-Zonen-Ansatz; Theoretische Grundlagen, Ableitung der Auswertegleichungen und Anwendung, strukturiert ausgehend von den theoretischen Ansätzen zur Auswertung (Regressi-

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
						on, Integral und Mittelwertmethoden); Fehleranalyse für alle Methoden
Sherman. 1990	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Theoretischer Methoden-Review; Zusammenfassung von Sherman 1989 beschränkt auf Ein-Zonen-Ansatz
Sherman et al. 2014				PFT Konstant-Injektions-methode (PFT) n. a.		Review-Artikel zu Unsicherheit der PFT-Methode; Fehleranalyse (Messfehler (Emission, Sammlung, Transport, Analytik), Fehler durch unzureichendes GG, schwankende LWR und Durchmischung) Theoretisch abgeschätzte Unsicherheit 10-15 %, Unsicherheit in kontrollierter Anwendungsstudie (Lunden 2012) 20 %, geschätzte Unsicherheit in typischer Feldanwendung Faktor 2; Anwendungshinweise um Unsicherheit zu minimieren
Shinohara 2010		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode		HFB, OFT, PFAB Konstant-Injektions-methode		Vergleichende Studie bzgl. Tracergas und Methode; Emissionsquelle: Doppelwandiges Vial mit Kanülen/Spritzenaufsatz und PE-Filter; Gute Übereinstimmung der Ergebnisse von Konstant-Injektionsmethode (HFB und

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
		Telaire 7001D (CO_2-Sensor IR)		Probenahme passiv auf Kohlenstoff-Molekularsieben, Extraktion durch Ultraschall mit CS_2, Analyse mittels GC-MS		OFT) und Konzentrations-Abklingmethode (CO_2); die Messung mit PFAB liefert ein um 40 % höheres Ergebnis
Smith 1988	SF_6	CO_2				Anwendungsstudie des „Mass Balance Approach“ von Penman 1982; Multi-Zonen-Ansatz; Vergleich zu SF_6-Abklingmethode in einer Zone für zwei von drei Vergleichsmessungen gut; Fehleranalyse mit Anwendungshinweisen
	Konzentrations-Abklingmethode	Mass Balance Approach				
	Gasanalysator	IR				
Stymne et al. 1994				HFB, OFT		Anwendungsstudie mit Theorieteil; Ein- und Zwei-Zonen-Ansatz; Technische Unsicherheit der Methode 11,1 %; Gesamtunsicherheit (Methode + Durchmischung): für 90 % der Messergebnisse kleiner 40 %, für 50 % der Messergebnisse kleiner 16 %; Exemplarischer Fehler durch Ein-Zonen-Ansatz für Quellen im Obergeschoss höher (38 %) als im Erdgeschoss (13 %)
				Konstant-Injektions-methode (PFT)		
				Probenahme passiv, 1 Monat Aktivkohlefüllung, Flüssig-Extraktion,		

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
				GC/ECD		
Sundell 2006	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Literaturreview zu Zusammenhang von Luftwechselraten und Gesundheitsaspekten; Nur wenige Studien verfügbar, da oft auch methodische Mängel vorliegen; Starker Zusammenhang zwischen LWR und Symptomen des Sick Building Syndrom gefunden
Teijonsalo et al. 1996					Direktmessung des Luftvolumenstroms mittels Anemometer (Alnor GGA-16) und Staudrucksonde	Anwendungsstudie; Messung des Abluftstroms mit Anemometer und Staudrucksonde; Nur Gebäude mit mechanischer Belüftung, sowohl reine Frischluftzufuhr als auch mit rückgeführter Luft
Van Buggenhout et al. 2009		CO_2 Konzentrations-Abklingmethode Gasanalysator				Methodenstudie zum Einfluss der Messposition auf die Genauigkeit der LWR; Messungen in mechanisch belüfteter Prüfkammer bei hohen LWR von 9–27 h^{-1}: Fehler durch Messposition bis 86 %, am Luftauslass <10 %
Van Ryswyk				PMCH, PDCH		Methodenstudie;

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
et al. 2015				Konstant-Injektions-methode (PFT) Sammlung 24 h passiv auf Kapil-laradsorptions-sammler mit Ambersorb; GC/ECD (BNL)		PFT-Messungen mittels Ein-Zonen-Ansatz unterschätzen LWR in kanadischen Häu-sern um ca. 16 % (im Vergleich zu Zwei-Zonen-Ansatz)
Walker & Forest 1995	SF_6 Konstant-Konzentrations-methode IR-Gasanalysator (Miran 1A)				Freon (R22) Konstant-Konzentrations-methode IR-Gasanalysator (Miran 1A)	Anwendungsstudie; Außenluft-Luftwechsel und Luftaustausch zwischen Wohnung und Dachboden; Gesamtfehler der LWR bei Zielkonzentrati-on 5 ppm und LWR unter 20 h^{-1}: 6 %; Dachboden-LWR abhängig von Wind; Luft-austausch zwischen Wohnraum und Dach-boden abhängig von Temperaturgradient
Wallace et al. 2002	SF_6 Konzentrations-Abklingmethode GC/ECD online Messung					Anwendungsstudie; Ein- und Drei-Zonen-Ansatz; Fehlerabschätzung zur Messmethode: 2-6 %, zusätzlicher Fehler durch Ein-Zonen-Ansatz: 10 %, unberücksichtigt sind Abwei-chungen durch ungenügende Durchmi-schung; Abhängigkeit der LWR von Temperaturgra-dient linear

Zitat	verwendetes Tracergas / Methode / Detektionssystem					Ergebnisse (Messmethodik und Qualitätssicherung)
	SF_6	CO_2	N_2O	PFT	Diverse	
Wegner 1982a			N_2O Konzentrations-Abklingmethode IR-Analysator (UNOR6)			Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Abhängigkeit der LWR von Fugendichtungen und Windgeschwindigkeiten
Wegner 1982b			N_2O Konzentrations-Abklingmethode IR-Analysator (UNOR6)			Anwendungsstudie; Zusammenfassung von Wegner 1982a; Ein-Zonen-Ansatz; Abhängigkeit der LWR von Fugendichtungen und Windgeschwindigkeiten
Yamamoto et al. 2010				PMCH Konstant-Injektions-methode (PFT) Sammlung 48 h passiv auf Kapillaradsorptions-sammler mit Ambersorb; GC/ECD		Anwendungsstudie; Ein-Zonen-Ansatz; Methode nach Dietz 1982; Equilibrierzeit 48 h, Emissionsraten durch Wiegen alle 3-4 Monate; Variationskoeffizient aus Doppelproben 18 %; LWR in Regionen mit Fensterlüftung im Sommer höher als mit Klimaanlage

Quelle: Eigene Darstellung gemäß Literaturauswertung (siehe Referenzen in Spalte 1)

2.2 Literaturrecherche zur toxikologischen Bewertung der eingesetzten Tracergase

Toxikologische Daten wurden zu den im Projekt verwendeten Gasen SF_6, CO_2, N_2O, HFB, OFT, PFD und PFN recherchiert. Die Recherche wurde vorwiegend über online öffentlich verfügbare Datenbanken durchgeführt. In Fällen, in denen zusätzliche Informationen notwendig waren, wurde Originalliteratur wie etwa Studienberichte recherchiert. Alle verwendeten Referenzen sind in einer bibliografischen Datenbank verfügbar.

Folgende Datenbanken und Regelwerke wurden recherchiert:

- Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (GESTIS), http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu
- Gefahrstoffdatenbank der Länder (GDL), https://www.gefahrstoff-in-fo.de/igs/oberfl/gdl/formHtml/default/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=auswahl_pr.htm&P_IGS_HOME=/oberfl/gdl&DATENBESTAND=GDL&enc=iso-8859-1&sprache=de&P_OBERFL=gdl&P_GDL=1
- Informationssystem gefährliche Stoffe des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 03/2018 (IGS), https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry
- Protective Action Criteria (vgl. PAC Rev. 29), https://sp.eota.energy.gov/pac/
- Permissible Exposure Limits (vgl. US PEL), https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html
- Permissible Exposure Limits (vgl. California PEL), https://www.dir.ca.gov/title8/ac1.pdf
- NIOSH Pocket Guide, https://www.cdc.gov/niosh/npg/search.html
- Liste der deutschen MAK-Werte 2017 (vgl. MAK 2017)
- Homepage der ECHA (ECHA), https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals
- Toxnet, TOXicology Data NETwork, U.S. National Library of Medicine, USA-Bethesda, MD 20894, https://toxnet.nlm.nih.gov/
- ChemIDplus, U.S. National Library of Medicine, USA-Bethesda, MD 20894, https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/
- Hazardous Substances Data Base (HSDB), U.S. National Library of Medicine, USA-Bethesda, MD 20894, https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB
- National Technical Reports Library (NTRL), US Department of Commerce, https://ntrl.ntis.gov/NTRL/
- US military technical guide 230, Revision 2013, Environmental Health Risk Assessment and Chemical Exposure Guidelines for Deployed Military Personnel (military exposure guideline, vgl. US MEG 2013)
- Sicherheitsdatenblätter einzelner Hersteller (SDB)
- UBA Datenbank zur Wassergefährdungsklasse (vgl. UBA Rigoletto), http://webrigoletto.uba.de/rigoletto
- Vorgaben zur Bewertung von Treibhauspotentialen (vgl. IPCC 2007, EPA GHGRP, Monitoring-VO).

2.2.1 Schwefelhexafluorid (SF_6) CAS-Nr. 2551-62-4

Zu Schwefelhexafluorid liegen umfassend Informationen in allen Datenbanken vor. Ausgewertet wurden: GESTIS (umfassende Information, vgl. GESTIS SF_6), GDL/IGS (komplett vorhanden, vgl. IGS SF6), PAC (vorhanden, vgl. PAC Rev. 29), MAK (vorhanden, vgl. MAK 2017), PEL (vorhanden, vgl. US PEL, California PEL 2018), ECHA (registriert, vgl. ECHA SF6; nachgefordert wurden Studien zu inhalativer Exposition bzgl. subchronischer Toxikologie und pränataler Entwicklung, vgl. ECHA decision SF6), US MEG (vorhanden, vgl. US MEG 2013), SDB (Air Liquide und PanGas).

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 20 °C: 21,1 bar; Dichteverhältnis zu Luft: 5,11; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 6,07 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Siehe Tabelle 3, die Grenz- und Richtwerte stimmen weitgehend überein mit 8-Stundenwerten von 1.000 ppm / 6.000 mg/m³. Kurzzeitwerte können deutlich darüber liegen und variieren entsprechend. Gemäß Sicherheitsdatenblatt der Firmen Air Liquide und PanGas (vgl. SDB SF6 Airliquide, SDB SF6 PanGas) wurde für Beschäftigte ein Nicht-Effekt-Level von 77.900 mg/m³ abgeleitet.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Die Hauptaufnahme erfolgt über den Atemtrakt. Aufnahme über Haut und Verdauungstrakt sind unwahrscheinlich. Das Verhalten ähnelt dem anderer Inertgase. Gefährdung besteht vornehmlich bei Kontakt mit verflüssigtem Gas, sehr hohen Luftkonzentrationen über 80 % und durch Verunreinigungen in Gasen mit „technical grade".

Die akute Toxizität ist geprägt durch folgende Symptome: Kälteschäden bei Kontakt mit verflüssigtem Gas oder bei direkter Inhalation von kaltem Gas aus der Druckgasflasche, Erstickung durch Sauerstoffverdrängung aus der Atemluft bei sehr hohen Konzentrationen (Luft-Konz. über 80 %, Sauerstoffgehalt unterhalb kritischer 18 %), leichte toxische Effekte bei Luft-Konzentrationen von 79-80 % (peripheres Kribbeln, Schläfrigkeit). Anzeichen einer Asphyxie sind: erhöhte Atemfrequenz, erhöhter Puls, leichte Koordinationsstörungen, emotionale Ausfälle, Mattigkeit, Übelkeit, Erbrechen. Bei Anwendung als Kontrastmittel traten vereinzelt allergische Reaktionen auf. Eine hohe inhalative Gefährdung besteht durch toxische Verunreinigungen in Gasen mit der Qualität „technical grade" und durch Zerfallsprodukten, die z. B. durch elektrische Entladung gebildet werden können (SF_4, SF_5, SF, SO_2F_2, SO_2F, HF);

Es gibt bisher keine Hinweise auf chronisch-toxische Wirkungen durch das reine Gas. SF_6 wird nicht metabolisiert, ist biologisch inert und wird unverändert abgeatmet. Die ECHA hat jedoch bei der Registrierung des Stoffes unter REACH eine 90-Tage Studie an Ratten, inhalative Exposition, zur subchronischen Toxizität nachgefordert.

Zur Reproduktionstoxikologie mit inhalativer Exposition liegen wenig Studien vor. Diese liefern bisher keinen Hinweis auf reproduktionstoxische Wirkung. Im Zuge der Registrierung des Stoffes hat die ECHA eine Inhalationsstudie an Ratten oder Kaninchen zur pränatalen Entwicklung nachgefordert.

In Bakterien- und Zellkulturen wurde keine Mutagenität nachgewiesen. Es wird insgesamt davon ausgegangen, dass keine genotoxische Wirkung vorliegt.

Zur Kanzerogenität werden keine Studien genannt. Die vorliegenden Kenntnisse zur Wirkweise geben keinen Anlass, eine kanzerogene Wirkung zu vermuten.

Bei der Registrierung unter REACH wurden zusätzlich Studien zur Neurotoxizität und „cardiac sensitization“ (Herzrhythmusstörungen durch erhöhte Empfindlichkeit auf Adrenalinspiegel) eingereicht, die keinen Hinweis auf diese Gefährdungen geben.

Umweltverhalten:

Schwefelhexafluorid ist ein sehr starkes Treibhausgas (GWP 22.800, 100-Jahreshorizont, vgl. IPCC 2007), es ist in der Monitoring-Verordnung der EU (vgl. Monitoring-VO) gelistet und unterliegt damit der Überwachung.

SF_6 ist als nicht wassergefährdend klassifiziert (vgl. AwSV 2017, UBA Rigoletto). Gemäß Sicherheitsdatenblatt SDB SF6 PanGas liegt die vorhergesagte Nicht-Effekt-Konzentration bei 0,15 mg/l, resp. 1,5 mg/l bei zeitweiliger/periodischer Freisetzung.

2.2.2 Distickstoffmonoxid (N_2O) CAS-Nr. 10024-97-2

Zu Distickstoffmonoxid liegen umfassend Informationen in allen Datenbanken vor. Ausgewertet wurden: GESTIS (umfassende Information, vgl. GESTIS N2O), GDL/IGS (komplett vorhanden, vgl. IGS N2O), PAC (vorhanden, vgl. PAC Rev. 29), MAK (vorhanden, vgl. MAK 2017), PEL (vorhanden, vgl. US PEL, California PEL 2018), ECHA (registriert, vgl. ECHA N2O), US MEG (vorhanden, vgl. US MEG 2013).

Sicherheitsdatenblätter wurden von verschiedenen Firmen geprüft (AIR LIQUIDE AUSTRIA GmbH, Messer Schweiz AG, Rießner-Gase GmbH, Widmann Gase GmbH) enthielten jedoch keine Zusatzinformationen.

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 20 °C: 50,6 bar; Dichteverhältnis zu Luft: 1,53; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 1,83 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Siehe Tabelle 3, die Bewertung in verschiedenen Regularien unterscheidet sich für N_2O deutlich vor allem hinsichtlich der reproduktionstoxikologischen Bewertung. 8-Stunden-Grenz- und Richtwerte liegen zwischen 25 und 100 ppm, Kurzzeitwerte variieren ebenfalls stark.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Die Hauptaufnahme erfolgt über den Atemtrakt, eine Aufnahme über die Haut ist theoretisch möglich. Im Blut gelöstest N_2O kann sich in luftgefüllten Körperhöhlen anreichern und zu einem Druckanstieg führen.

Als Formen der akuten Toxizität bei niedrigeren Konzentration werden Verhaltensstörungen beschrieben (veränderte Reaktionszeit, beeinträchtigte Gedächtnisleistung). Die Angaben dazu, welche Konzentrationen in diesem Sinne toxisch wirken können, schwanken stark von 0,005 % bis 10 %. Bei Konzentrationen zwischen 50 und 70 % treten Veränderungen des Blutbilds auf. In sehr hohen Konzentrationen (80 %) treten Empfindungsstörungen und Rauschzustände auf und die auch medizinisch genutzte narkotische Wirkung tritt ein. Bei Anwendung narkotischer Konzentrationen traten auch Herz-Kreislaufstörungen auf. Schleimhautirritation treten nicht auf, direkter Kontakt mit verflüssigtem N_2O führt jedoch zu Erfrierungen.

Als chronische Wirkung beschrieben sind hämatotoxische Effekte und neurologische Störungen bei wiederholter Gabe hoher Dosen. Da N_2O die Vitamin-B12-Aktivität herabsetzt, können Vitamin-B12-Mangelsymptome auftreten.

Bzgl. der reproduktionstoxischen Einordnung liegen Hinweise aus Tierstudien auf embryotoxische und teratogene Wirkung vor. Die Hinweise aus epidemiologischen Studien (einzelne Berichte über ein signifikant erhöhtes Risiko von Fertilitätsminderung und Spontanaborten bei beruflich Exponierten) und die Datenlage insgesamt reichen für eine Einstufung nach Angaben von GESTIS N2O mit Verweis auf die Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten nicht aus. Gemäß MAK 2017 ist N_2O in Schwangerschaftsgruppe C geführt (eine fruchtschädigende Wirkung ist bei Einhaltung des MAK- und BAT-Wertes nicht anzunehmen). In der Schweiz wird N_2O in der Liste der MAK-Werte (MAK CH 2016) als möglicherweise beeinträchtigend für Sexualfunktion, Fruchtbarkeit und Entwicklung eingestuft. In der Liste des US-Bundesstaates Kalifornien der Chemikalien, die aktuell als kanzerogen oder reproduktionstoxisch eingestuft sind, wird N_2O als reproduktionstoxisch geführt (vgl. Proposition 65 list).

Zur Mutagenität liegen unterschiedliche Studien vor. Während einige keine mutagene Wirkung belegen (vgl. ECHA N2O), gibt es in anderen Studien Hinweise auf DNA-Schädigungen an Leukozyten (vgl. HSDB N2O).

Zur Kanzerogenität liegen keine ausreichenden Daten vor, aus den bisherigen Studien gibt es jedoch keinen Hinweis auf kanzerogene Wirkung.

Umweltverhalten:

Distickstoffmonoxid ist ein starkes Treibhausgas (GWP 298, 100-Jahreshorizont, vgl. IPCC 2007), es ist in der Monitoring-Verordnung der EU (vgl. Monitoring-VO) gelistet und unterliegt damit der Überwachung. Das Ozonabbaupotential ist mit 0 angegeben.

N_2O ist als schwach wassergefährdend eingestuft (WGK 1, vgl. AwSV 2017, UBA Rigoletto).

2.2.3 Kohlendioxid (CO_2) CAS-Nr. 124-38-9

Zu Kohlendioxid liegen umfassend Informationen in allen Datenbanken vor. Ausgewertet wurden: GESTIS (umfassende Information, vgl. GESTIS CO2), GDL/IGS (komplett vorhanden, vgl. IGS CO2), von PAC-Liste Rev. 29 gelöscht, MAK (vorhanden, vgl. MAK 2017), PEL (vorhanden, vgl. US PEL, California PEL 2018), ECHA (CO_2 als solches nicht registrierungspflichtig unter REACH; als Biozid registriert, vgl. ECHA biocide CO2), US MEG (vorhanden, vgl. US MEG 2013), SDB (Praxair).

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 20 °C: 57,3 bar; Dichteverhältnis zu Luft: 1,53; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 1,83 mg/m³; gut wasserlöslich.

Grenz- und Richtwerte:

Siehe Tabelle 3, 8-Stunden-Grenz- und Richtwerte stimmen weitgehend überein mit 5.000 ppm / 9.000 mg/m³. Kurzzeitwerte variieren stärker zwischen 10.000 ppm und 30.000 ppm.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Die Hauptaufnahme von CO_2 erfolgt über Respiration und Verdauung (kohlensäurehaltige Getränke). Vergiftungen durch den Verdauungstrakt sind nicht praxisrelevant (lediglich Völlegefühl). Da CO_2 kein Fremdstoff ist, existieren Regulationsmechanismen die auch kurzzeitige moderate Erhöhungen der Luftkonzentration ausgleichen. Stark erhöhte Konzentrationen führen dagegen auch kurzzeitig zu massiven Reaktionen, die nicht nur auf Sauerstoffmangel zurückzuführen sind. Bei Kontakt mit verflüssigtem oder festem CO_2 (Trockeneis) können Erfrierungen auftreten.

Die akute Toxizität der CO_2-Inhalation zeigt sich in Wirkungen auf Atemzentrum, Stoffwechsel, Herz-/Kreislauf- und Zentralnervensystem. Bereits ab 1.000 ppm können bei empfindlichen Personen erste Reaktionen wie Kopfschmerzen beobachtet werden. Die kritische Wirkung von CO_2 ist die Azidose, beschrieben ab Kurzzeitexpositionen gegenüber 10.000 ppm bei körperlicher Betätigung. Ab 40.000 ppm (4 %) sind deutliche Effekte auf Herz-/Kreislauf- und Zentralnervensystem beschrieben. Zur kritischen Konzentration bzgl. Bewußtseinsverlust liegen differierende Angaben vor (ab 10 % Luftkonzentration). Bei beschriebenen Todesfällen durch CO_2-Inhalation (häufig angereicherte CO_2-Konzentration in Kesseln, Gruben, Brunnen) wurden v. a. Veränderungen an Augen und Gehirn dokumentiert. Todesfälle sind ab ca. 20 % Luftkonzentration möglich, dabei kann es zu plötzlichem Bewußtseinsverlust und einem Eintritt des Todes innerhalb weniger Minuten kommen. In einigen Fällen waren Hirnschädigungen so stark, dass die Pateinten nach einigen Tagen verstarben (vgl. SDB CO2 Praxair). In Fällen schwerer Vergiftungen, die überlebt wurden, blieben häufig Augenschäden zurück.

Die chronische Wirkung von stark erhöhter CO_2-Inhalation betrifft v. a. ZNS und Herz-/Kreislaufsystem. Hierzu liegen wenige Daten vor. Epidemiolgische Auswertungen beruflich exponierter Arbeiter (bei ca. 10.000 ppm) geben einen Hinweis auf Azidose und Stoffwechselveränderungen (Carbonat in Blut und Knochen erhöht). Bei mehrwöchigem Aufenthalt mit 3 % CO_2 in Inspirationsluft (U-Boot) wurden ZNS-Depression, Herz-/Kreislaufveränderungen, veränderte Atemfrequenz und mentale Beeinträchtigungen beobachtet.

Bzgl. der reproduktionstoxikologischen Wirkung von CO_2 sind in der ausgewerteten Literatur keine negativen Erfahrungen mit exponierten Schwangeren bei moderaten Konzentrationen (unter 0,5 %) beschrieben. Um den CO_2-Partialdruck für den Fötus auf ungefährlichem Niveau zu halten, wurde eine Begrenzung der Exposition für schwangere Frauen auf maximal 5.000 ppm empfohlen. In Tierstudien wurden bei hohen Konzentrationen teratogene Veränderungen (6-13 % Luftkonz.) sowie eine reversible Beeinflussung der männlichen Fertilität (2,5-35 % Luftkonz.) nachgewiesen.

Zu genotoxischer Wirkungen und Kanzerogenität liegen keine Angaben vor.

Umweltverhalten:

Kohlendioxid ist ein Treibhausgas, sein Treibhauspotential wird als Referenzpunkt verwendet und liegt definitionsgemäß bei 1 (GWP 1, 100-Jahreshorizont, vgl. IPCC 2007). Es ist daher in der Monitoring-Verordnung der EU (vgl. Monitoring-VO) gelistet und unterliegt damit der Überwachung. Das Ozonabbaupotential ist mit 0 angegeben.

CO_2 ist als nicht wassergefährdend eingestuft (nwg, vgl. AwSV 2017, UBA Rigoletto). Gemäß SDB CO2 Praxair ist eine Gefährdung von Fischen und Plankton durch Verdrängen des Sauerstoffs in Wasser möglich.

2.2.4 Hexafluorbenzol (HFB, C_6F_6) CAS-Nr. 392-56-3

Zu HFB liegen nur begrenzt Informationen vor. Ausgewertet wurden: IGS (vgl. IGS HFB), PAC (vorhanden, vgl. PAC Rev. 29), ECHA (im Vorregistrierungsprozess, in Annex III-Liste genannt, C&L verfügbar, vgl. ECHA HFB), US MEG (vorhanden, vgl. US MEG 2013), SDB (Acros, Alfa Aesar, Sigma-Aldrich, Thermo Fisher). Da die Datenlage gering ist, wurden einzelne Literaturstellen mitausgewertet, die im Text referenziert sind.

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 20 °C: 77 mbar; liegt bei Normalbedingungen als Flüssigkeit vor; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 7,73 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Siehe Tabelle 3. Für HFB liegt kein MAK-Wert vor, ein 8-Stunden-Grenzwert ist aus Russland und Litauen bekannt (5 mg/m³, ca. 0,7 ppm), aus den USA sind Kurzzeitwerte mit geringer oder keiner Beeinträchtigung je nach Fragestellung von 6,6 ppm bis 3.500 mg/m³ (ca. 450 ppm) belegt.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Insgesamt liegen wenige Informationen zur Toxizität von HFB vor. Die weite Streuung der Grenzwerte spiegelt das wider. Während der PAC-3-Wert von 440 ppm gemäß PAC Rev. 29 aus der LC_{50}-Konzentration (120 min) an Ratten abgeleitet wurde, lag dieser Wert in Studien der Firma DuPont (DuPont 1992) bei 11.800 ppm. Für Mäuse wird ein LC_{50}-Wert von 95.000 mg/m³ (ca. 12.300 ppm) angegeben (vgl. ChemIDplus HFB, SDB HFB Acros, SDB HFB Sigma).

In der Schweiz war HFB im inzwischen überholten Giftklassensystem als Giftklasse 3 eingestuft (Bezug nur gegen Empfangsbestätigung, LD_{50}: 50-500 mg/kg, vgl. CH Giftliste 2004).

Insgesamt bewertet DuPont in DuPont 1992 die Toxizität von HFB als gering. Bei inhalativer Exposition wird eine Gefährdung durch Atemwegsreizungen und Effekte auf das Zentralnervensystem benannt. Die Studie wurde bei Luftkonzentrationen von 9.000 ppm bis 18.000 ppm durchgeführt.

Hinweise auf Haut- und Augenreizungen enthalten auch die Sicherheitsdatenblätter zu HFB von Alfa Aesar (vgl. SDB HFB Alfa Aesar) sowie die Einträge im C&L Inventory der ECHA (vgl. ECHA HFB). Im Sicherheitsdatenblatt von Thermo Fisher (vgl. SDB HFB Thermo) sind als mögliche akute Symptome bei hohen Luftkonzentrationen Kopfschmerzen, Benommenheit, Müdigkeit und Übelkeit genannt.

Einzelne Ergebnisse liegen zu verschiedenen Parametern vor, z. B. zur anästhetischen Wirkung bei Mäusen mit vorausgehenden Zuckungen (2.000 ppm bis 35.000 ppm, vgl. Krantz 1966 und Fang 1996), zur Wirkung als hepatisch mikrosomaler Enzyminduktor (vgl. Nhachi 1986) sowie zur Diskussion, ob HFB Porphyrie induziert (vgl. Smith 1980, Rietjens 1995).

Zur reproduktionstoxikologischen Bewertung liegen keine ausreichenden Informationen vor. Erste Ergebnisse haben keinen Hinweis auf teratogene oder foetotoxische Effekte gegeben (vgl. Courtney 1984).

Auch zur Genotoxizität liegen keine ausreichenden Daten vor. Erste Ergebnisse lieferten keine Anhaltspunkte für mutagene Wirkung (vgl. Mortelmans 1979).

Zur Kanzerogenität liegen keine Informationen vor.

Umweltverhalten:

Für HFB wurde bisher kein offizieller GWP-Wert abgeleitet. Die amerikanische Umweltbehörde EPA hat 2014 ihre Regeln zur Treibhausgasberichterstattung dahingehend ergänzt, dass jetzt neben spezifischen GWP-Werten auch Standardwerte für bestimmte Klassen von fluorierten Verbindungen enthalten sind (vgl. EPA GHGRP 2014). Gemäß den dort beschriebenen Regeln, wäre HFB als Treibhausgas mit GWP 1 zu werten (Kategorie „unsaturated perfluorocarbons“).

Für HFB wurde bisher keine Stoffeinstufung bzgl. der Wassergefährdung veröffentlicht (vgl. UBA Rigoletto). Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich (vgl. SDB HFB Sigma) ist als Selbsteinstufung WGK 3 (stark wassergefährdend) angegeben.

Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Thermo Fisher (vgl. SDB HFB Thermo) sind folgende weitere Angaben zum Umweltverhalten aufgeführt: Persistenz ist unwahrscheinlich, ist vermutlich mobil in der Umwelt.

2.2.5 Octafluortoluol/Perfluortoluol (OFT, C_7F_8) CAS-Nr. 434-64-0

Auch zu OFT liegen nur begrenzt Informationen vor. Ausgewertet wurden: IGS (vgl. IGS OFT), ECHA (im Vorregistrierungsprozess, in Annex III-Liste genannt, C&L verfügbar, vgl. ECHA OFT), SDB (Alfa Aesar, Sigma-Aldrich, Synquest). Da die Datenlage gering ist, wurden einzelne Literaturstellen mitausgewertet, die im Text referenziert sind.

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 25 °C: 38,7 mbar; liegt bei Normalbedingungen als Flüssigkeit vor; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 9,81 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Siehe Tabelle 2. Für OFT liegt kein MAK-Wert vor, ein 8-Stunden-Grenzwert ist aus Russland bekannt (5 mg/m³, ca. 0,5 ppm).

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Zu OFT liegen insgesamt wenige Daten zur toxikologischen Bewertung vor. In den ausgewerteten Sicherheitsdatenblättern sowie im C&L Inventory der ECHA (vgl. SDB OFT Alfa Aesar, SDB OFT Sigma, SDB OFT Synquest, ECHA OFT) sind folgende möglichen Gesundheitsbeeinträchtigungen genannt: Gesundheitsschädlich beim Verschlucken, verursacht Hautreizungen, verursacht schwere Augenreizungen, ist giftig beim Einatmen, kann die Atemwege reizen.

Zur inhalativen Toxizität finden sich in der Literatur Hinweise auf akut-toxische Wirkung auf das ZNS mit Schüttelkrämpfen mit Todesfolge an Mäusen und Ratten (vgl. Fang 1996, Dilley 1979, SDB OFT Sigma). Beschrieben wird dort auch, dass überlebende Tiere hoher Dosisgruppen tiefe langanhaltende Anästhesie, sowie irreversible Schäden an Niere und Verlust der neuromuskulären Funktion aufwiesen. Da die anästhetische Wirkung nahe an der letalen Konzentration einsetzt, wurde OFT (anders als HFB) aus der Studie von Fang 1996 zu anästhetischen Wirkmechanismen als zu toxisch ausgeschlossen.

Als mittlere letale Konzentration für Ratten wird bei Dilley 1979 ein LC_{50}-Wert bei einstündiger Exposition von 1.141 ppm angegeben (vgl. auch SDB OFT Sigma, SDB OFT Synquest). Als niedrigste letale Konzentration an Mäusen wird bei Burns 1964 bei 10-minütiger Exposition von 5.000 ppm bis 9.000 ppm (LC_{LO}) genannt (vgl. auch Fang 1996). Bei Fang 1996 wurden für kurzzeitige Exposition ähnliche letale Konzentrationen an Ratten gefunden (LC_{LO} 2.600 ppm). Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Alfa Aesar ist ein LC_{50}-Wert für 4-stündige inhalative Exposition an Ratten mit 2.700 mg/m³ (ca. 275 ppm) angegeben.

Zur reproduktionstoxikologischen Bewertung liegen keine ausreichenden Informationen vor.

Auch zur Genotoxizität liegen keine ausreichenden Daten vor. Erste Ergebnisse lieferten keine Anhaltspunkte für mutagene Wirkung (vgl. Mortelmans 1979).

Zur Kanzerogenität liegen keine Informationen vor.

Umweltverhalten:

Für OFT wurde bisher kein offizieller GWP-Wert abgeleitet. Die amerikanische Umweltbehörde EPA hat 2014 ihre Regeln zur Treibhausgasberichterstattung dahingehend ergänzt, dass jetzt neben spezifischen GWP-Werten auch Standardwerte für bestimmte Klassen von fluorierten Verbindungen enthal-

ten sind (vgl. EPA GHGRP 2014). Gemäß den dort beschriebenen Regeln, wäre OFT als Treibhausgas mit GWP 1 zu werten (Kategorie „unsaturated perfluorocarbons“).

Für OFT wurde bisher keine Stoffeinstufung bzgl. der Wassergefährdung veröffentlichet (vgl. UBA Rigoletto). Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich (vgl. SDB OFT Sigma) ist als Selbsteinstufung WGK 3 (stark wassergefährdend) angegeben.

2.2.6 Perfluordecalin (PFD, $C_{10}F_{18}$) CAS-Nr. 306-94-5

Trotz medizinischer Anwendung von PFD liegen nur begrenzt frei zugängliche Informationen zur Toxizität vor. Ausgewertet wurden: IGS (vgl. IGS PFD), ECHA (Registrierungsdossier und Brief Profile, vgl. ECHA PFD), Patienteninformation zu Fluoron (vgl. Fluoron PIL), SDB (Thermo Fisher, Sigma-Aldrich, F2chemicals). Da die Datenlage gering ist, wurden einzelne Literaturstellen mit ausgewertet, die im Text referenziert sind.

Physikalische Daten:

Dampfdruck bei 25 °C: 8,8 mbar, liegt bei Normalbedingungen als Flüssigkeit vor; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 19,20 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Für PFD liegen keine Grenz- oder Richtwerte vor.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

Insgesamt sind nur wenige Daten zur Toxizität zugänglich. Das Registrierungsdossier zu PFD (vgl. ECHA PFD) enthält einzelne Hinweise auf eine generell geringe Toxizität. In der Studie von Dilley 1979 an Ratten wurden bei Inhalation von bis zu 8.647 ppm für 1 h keine akut toxischen Effekte beobachtet. In den Sicherheitsdatenblättern der Firmen Thermo Fisher, F2chemicals und Sigma-Aldrich (vgl. SDB PFD Thermo, SDB PFD F2, SDB PFD Sigma) sind keine Kennzeichnungen angegeben und die Substanz als nicht gefährlich für Mensch und Umwelt bezeichnet. Dies entspricht dem Brief Profile der Substanz in der Datenbank der ECHA (vgl. ECHA PFD brief), dort gaben 90 % der Einreicher keine Klassifizierung bzgl. möglicher Gesundheitsschäden an. Im entsprechenden Registrierungsdossier (vgl. ECHA PFD) werden einzelne Studien genannt, die weder reizende noch sensibilisierende Wirkung von PFD aufzeigen. Die Einreichung erfolgte in der Kategorie „Perfluorocarbons“, denen als Klasse chemisch inertes Verhalten sowie fehlende Metabolisierung im Körper zugeschreiben wird. PFD wird vom Körper zügig über die Lungen abgeatmet. Wie bei den anderen fluorierten Verbindungen auch können jedoch im Brandfall toxische Gase entstehen.

Zwei Anwendungsgebiete von PFD im medizinischen Bereich sind beschrieben, in der Augenchirurgie und zur Flüssigbeatmung.

In der Ophthalmologie wird die hohe Dichte und chemische Inertheit ausgenutzt und PFD als intraoperatives Tamponademedium eingesetzt (vgl. Fluoron PIL und Fluoron Lit). Das Produkt wird hier als inert und bei bestimmungsgemäßer Kurzzeitanwendung als nicht toxisch eingestuft. Bei Langzeitanwendung sind Veränderungen der Netz- und Aderhaut möglich.

Die Fähigkeit von PFD Gase und damit auch Sauerstoff gelöst zu transportieren wird medizinisch genutzt und PFD kann als Mittel zur Flüssigbeatmung eingesetzt werden. Der gleiche Effekt kann auch missbräuchlich im Sport genutzt werden. Während zum Einsatz an Menschen wenig bekannt ist, ist PFD auf der Liste verbotener Stoffe im Pferdesport geführt (vgl. EPSL 2018). Vorteile und Risiken von Perfluorcarbonen in der Flüssigbeatmung sind u.a. in Schnabel 2010, Walker 2003 und Wemhöner 2010 beschrieben. Als Vorteile werden die vollständige Evaporation über die Lunge, Verbesserung der

respiratorischen Compliance resp. des Lungenvolumens und anti-inflammatorische Wirkung. Unerwünschte Effekte können durch Eindringen der Perfluorcarbone in Intravasalraum und Pleuraspalt auftreten. Die Auswirkungen auf die Surfactantschicht sind widersprüchlich beschrieben.

Zur reproduktionstoxikologischen Bewertung liegen keine ausreichenden Informationen vor.

Auch zur Genotoxizität liegen keine ausreichenden Daten vor. Erste Ergebnisse lieferten keine Anhaltspunkte für mutagene Wirkung (vgl. Mortelmans 1979).

Zur Kanzerogenität liegen keine Informationen vor.

Umweltverhalten:

PFD ist ein sehr starkes Treibhausgas mit einem GWP-Wert von > 7.500 im 100-Jahreshorizont (vgl. IPCC 2007), es ist in der Monitoring-Verordnung der EU (vgl. Monitoring-VO) gelistet und unterliegt damit der Überwachung.

Für PFD wurde bisher keine Stoffeinstufung bzgl. der Wassergefährdung veröffentlichet (vgl. UBA Rigoletto). Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich (vgl. SDB PFD Sigma) ist als Selbsteinstufung WGK 3 (stark wassergefährdend) angegeben, im SDB der Fa. Thermo Fisher hingegen WGK 1.

Im Registrierungsdossier (vgl. ECHA PFD) ist PFD als nicht biologisch abbaubar, ohne Gefahr für aquatische Organismen, nicht bioakkumulierend, extrem stabil gegen Hydrolyse und Licht.

2.2.7 Perfluornaphthalin (PFN, $C_{10}F_8$) CAS-Nr. 313-72-4

Zu PFN wurden in den gängigen Datenbanken (s.o.) keine toxikologischen Daten gefunden, weitere Erläuterungen im folgenden Text zur Toxizität.

Physikalische Daten:

Keine Angaben zum Dampfdruck, PFN liegt bei Normalbedingungen als Feststoff vor; Umrechnung von ppm in mg/m³ (Gasphase) bei 1.013 mbar und 20 °C: 1 ppm entspricht 11,31 mg/m³.

Grenz- und Richtwerte:

Für PFN liegen keine Grenz- oder Richtwerte vor.

Zusammenfassung toxikologischer Angaben:

In der IGS-Datenbank (vgl. IGS PFN) ist die Substanz zwar gelistet, es sind jedoch keine Grenzwerte oder toxikologischen Einordnungen genannt. In den Datenbanken ToxLine, HSDB und ChemIDplus sind keine Daten zur Toxizität zu finden (vgl. exemplarisch ChemIDplus PFN, ToxLine PFN). Auch die Überblicks-Datenbank der US-amerikanischen Umweltbehörde, das Chemistry Dashboard CompTox, enthält keine Hinweise auf toxikologische Daten (vgl. EPA CompTox PFN).

Die Substanz befindet sich derzeit in der REACH-Vorregistrierungsphase (vgl. ECHA PFN). Übereinstimmend mit den zusätzlich geprüften Sicherheitsdatenblättern der Firmen Alfa Aesar, Sigma-Aldrich und Synquest (vgl. SDB PFN Alfa, SDB PFN Sigma, SDB PFN Synquest) sind im C&L Inventory der ECHA Gefahrenhinweise auf Hautreizungen, schwere Augenreizungen und die Möglichkeit der Atemwegsreizung angegeben. Die Klassifizierung der Gesundheitsgefährdung im Hazardous Materials Identification System (HMIS) unterscheidet sich zwischen den Herstellern und liegt zwischen 1 (irritation or minor reversible injury possible) und 2 (Temporary or minor injury may occur). Im SDB der Fa. Alfa Aesar wird auf die inzwischen ungültige Unfallverhütungsvorschrift zum Umgang mit gesundheitsgefährdenden Stäuben (VBG 119) verwiesen. Weitere Angaben zur Toxizität liegen nicht vor.

Zur reproduktionstoxikologischen Bewertung liegen keine ausreichenden Informationen vor.

Auch zur Genotoxizität liegen keine ausreichenden Daten vor. Erste Ergebnisse lieferten keine Anhaltspunkte für mutagene Wirkung (vgl. Mortelmans 1979).

Zur Kanzerogenität liegen keine Informationen vor.

Umweltverhalten:

Für PFN wurde bisher kein offizieller GWP-Wert abgeleitet. Die amerikanische Umweltbehörde EPA hat 2014 ihre Regeln zur Treibhausgasberichterstattung dahingehend ergänzt, dass jetzt neben spezifischen GWP-Werten auch Standardwerte für bestimmte Klassen von fluorierten Verbindungen enthalten sind (vgl. EPA GHGRP 2014). Gemäß den dort beschriebenen Regeln, wäre PFN als Treibhausgas mit GWP 1 zu werten (Kategorie „unsaturated perfluorocarbons“).

Für PFN wurde bisher keine Stoffeinstufung bzgl. der Wassergefährdung veröffentlichet (vgl. UBA Rigoletto). Im Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich (vgl. SDB PFN Sigma) ist als Selbsteinstufung WGK 3 (stark wassergefährdend) angegeben, im SDB der Fa. Alfa Aesar (vgl. SDB PFN Alfa) wird PFN dagegen als „im Allgemeinen nicht wassergefährdend“ bezeichnet.

2.2.8 Übersicht Grenz- und Richtwerte

Die Grenzwerte (MAK-Werte), die in VDI 4300 Blatt 7 angegeben sind, stimmen für den Schichtmittelwert in ppm mit den hier recherchierten und referenzierten Werten von 2017 überein (vgl. MAK 2017). Geändert haben sich jedoch die Spitzenbegrenzungen für alle drei Gase, die einen MAK-Wert haben: In der VDI ist für SF_6, CO_2 und N_2O ein Überschreitungsfaktor von 4 angegeben, neu liegen die Spitzenbegrenzungen für den 15 min-Mittelwert bei Faktor 8 für SF_6, jedoch nur noch bei Faktor 2 für CO_2 und N_2O. Die folgenden Tabellen fassen Grenzwerte, relevante Kennzahlen und Messbereiche der Gase zusammen.

Tabelle 2: Übersicht verwendeter Tracergase – Messbereiche im Vergleich zu MAK-Werten

Tracergas	MAK 2017 (DE) [ppm]	Messbereich Photoakustischer Monitor[a)] [ppm]	Messbereich GC/ECD oder GC/MS [ppm]	Messbereich IR [ppm]	Maximal-Konzentrationen Praxisteil[d)] [ppm]
SF_6	1.000	0,006 - 15 (60)	$5x10^{-6}$ - 0,2[b)]	0,1 - 100[b)]	5
CO_2	5.000	5 - 3.500 (5.000)	k. A.	1 – 5.000[b)]	3.500
N_2O	100	0,03 - 5 (300)	k. A.	1 – 200[b)]	7
PFT	k. A.	0,009 - 18,5 (90)	$10x10^{-6}$ – 0,1[c)]	k. A.	0.01

Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an VDI 4300 Blatt 7 und Charlesworth 1988, Daten unter Berücksichtigung nachfolgender Referenzen und Verweise:

a) Nachweisgrenze und Kalibriergaswert für Innova 1312 wie hier eingesetzt. Linearer Bereich bei Einpunktkalibrierung bis 10.000-fache Nachweisgrenze, in Klammern angegeben.

b) Werte entnommen aus Ref. VDI 4300 Blatt 7.

c) TD-GC/MS wie hier validiert und kalibriert.

d) Werte wie in vorliegender Studie maximal als Startkonzentration eingesetzt.

Tabelle 3: Übersicht verwendeter Tracergase – Grenzwerte in Luft, Wassergefährdungsklassen und Treibhauspotential

Sub-stanz	CAS Num-mer	Arbeitsplatz-grenzwerte DE	Arbeitsplatz-grenzwerte AT	Arbeitsplatz-grenzwerte CH	Arbeitsplatz-grenzwerte USA	Sonstige Grenz- und Richtwerte	Wasserge-fährdungs-klasse	Treibhauspoten-tial (GWP, 100-Jahreshorizont)
SF_6	2551-62-4	MAK Schicht 1.000 ppm/ 6.100 mg/m³ MAK Peak 8.000 ppm (Gruppe II, Faktor 8, 15 min MW, 4x pro Schicht) Schwanger-schaftsgruppe D	MAK Schicht 1.000 ppm/ 6.000 mg/m³ MAK Peak 2.000 ppm (60 min Mo-mentan wert, 3x pro Schicht)	MAK Schicht 1.000 ppm/ 6000 mg/m³ Ehemals ohne Giftklasse	OSHA PEL 1.000 ppm/ 6.000 mg/m³ Cal/OSHA PEL 1.000 ppm/ 6.000 mg/m³ NIOSH REL 1.000 ppm	PAC-1: 3.000 ppm PAC-2: 33.000 ppm PAC-3: 200.000 ppm MEG 1h negligible 15.000 mg/m³ MEG 1h marginal 30.000 mg/m³ MEG 1h critical 30.000 mg/m³ MEG 8h negligible 6.000 mg/m³ MEG 14 days negligible 1.500 mg/m³ MEG 1 year negligible 1.500 mg/m³	nicht wasserge-fährdend	22.800
N_2O	10024-97-2	MAK Schicht 100 ppm/ 180 mg/m3 MAK Peak 200 ppm (Gruppe II, Faktor 2 15 min MW,	MAK Schicht 100 ppm / 180 mg/m3 MAK Peak 400 ppm (15 min MW, 4x pro Schicht)	MAK Schicht 100 ppm / 182 mg/m3 Ehemals Gift-klasse 3	Cal/OSHA PEL 50 ppm/ 90 mg/m3 NIOSH REL 25 ppm	PAC-1: 910 ppm PAC-2: 10.000 ppm PAC-3: 20.000 ppm MEG 1h negligible 250 mg/m3 MEG 1h marginal 15.000 mg/m3 MEG 1h critical	WGK 1	298

		4x pro Schicht) Schwanger-schaftsgruppe C				35.000 mg/m3 MEG 8h negligible 90 mg/m3 MEG 14 days negligible 22 mg/m3 MEG 1 year negligible 22 mg/m3		
CO_2	124-38-9	MAK Schicht 5.000 ppm/ 9.100 mg/m3 MAK Peak 10.000 ppm (Gruppe II, Faktor 2 15 min MW, 4x pro Schicht)	MAK Schicht 5.000 ppm/ 9.000 mg/m3 MAK Peak 10.000 ppm (60 min Mo-mentanwert, 3x pro Schicht)	Ehemals Gift-klasse 5	OSHA PEL 5.000 ppm/ 9.000 mg/m3 Cal/OSHA PEL 5.000 ppm Cal/OSHA STEL 30.000 ppm NIOSH REL 5.000 ppm NIOSH STEL 30.000 ppm	PAC-1: 30.000 ppm PAC-2: 40.000 ppm PAC-3: 50.000 ppm MEG 1h negligible 50.000 mg/m MEG 1h marginal 50.000 mg/m3 MEG 1h critical 75.000 mg/m MEG 8h negligible 14.000 mg/m3 MEG 14 days negligible 14.000 mg/m3 MEG 1 year negligible 2200 mg/m3	nicht wasserge-fährdend	1
HFB	392-56-3			Ehemals Gift-klasse 3		Schichtmittelwert LT/RU 5mg/m3 PAC-1: 6,6 ppm PAC-2: 73 ppm PAC-3: 440 ppm		<1>

						MEG 1h negligible 3.500 mg/m3 MEG 1h marginal 13.000 mg/m3 MEG 1h critical 13.000 mg/m3		
OFT	434-64-0					Schichtmittelwert LT/RU 5mg/m3		<1>
PFD	306-94-5							>7500
PFN	313-72-4							<1>

Quellen: Die hier angegebenen Werte sind entnommen aus den Referenzen MAK 2017, MAK AT 2017, MAK CH 2016, US PEL, California PEL 2018, NIOSH REL, PAC Rev. 29, US MEG 2013, CH Giftliste 2004, IGS HFB, IGS OFT, AwSV 2017, UBA Rigoletto, IPCC 2007, EPA GHRP. Eine Übersicht über internationale Grenzwerte findet sich auf http://limitvalue.ifa.dguv.de/ sowie dem EPA CompTox Dashboard https://comptox.epa.gov/dashboard.

3 Geräte, Materialien und Qualitätssichernde Maßnahmen

3.1 Messkammer und Realraum

Messkammer

Einige Messungen zur Qualitätssicherung wurden in Messkammern mit kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Die hierfür eingesetzten Kammern wurden gemäß DIN EN ISO 16000-9 hergestellt und bestehen aus Glas, sind luftundurchlässig abgedichtet sowie mit einer kontrollierten Zuluft ausgestattet. Eine unkontrollierte Infiltration durch das Kammergehäuse kann vernachlässigt werden. Der Luftfluss in die Kammer wird durch Flowmeter kontrolliert (1 m^3-Kammer: Abweichung des Luftflusses 1,8 %). Die gemessenen Luftwechselraten beziehen sich daher auf den Luftaustausch durch die geregelte Zuluft.

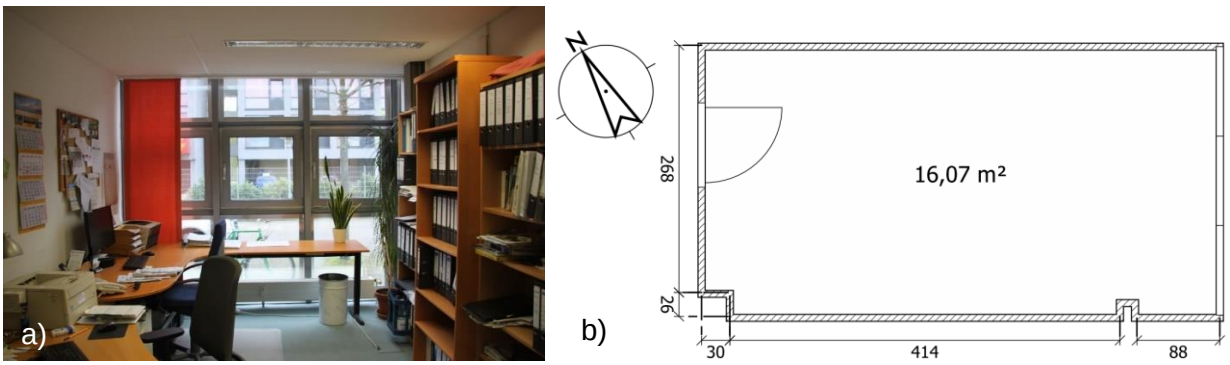
Verwendet wurden Kammern der Größe 250 L (Messungen für Perfluornaphthalin) und 1 m^3 (alle weiteren Messungen). Die Messungen für Perfluornaphthalin wurden in einer kleineren Kammer durchgeführt, um ausreichende Luftkonzentrationen trotz geringer Emissionsraten zu erreichen. Beide Kammern sind mit einem Ventilator ausgerüstet, der die Durchmischung der Gase gewährleistet. Alle Kammern werden routinemäßig für Emissionsmessungen verwendet und unterliegen daher bzgl. Dichtheit, Luftreinheit und Flusskontrolle dem Qualitätssicherungssytem des Instituts. Messegräte können über Schläuche durch Aussparungen in der Kammerwand mit der Kammerluft verbunden werden. Die Aussparungen wurden nach Einbringen der Schläuche entsprechend abgedichtet.

Die Kammern befinden sich in einem klimatisierten Laborraum (Kammer-Raum), in dem ausschließlich Kammermessungen durchgeführt werden.

Realraum

Der Büroraum, der für die Untersuchungen verwendet wurde, weist eine gebrauchsübliche Ausstattung mit zwei Schreibtischen und 4 Regalen auf (siehe Abbildung 1). Er wurde mit einer technischen Lüftung ausgestattet, um reproduzierbare Bedingungen herstellen zu können (Belüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung, Fabrikat Cosmo, Typ Eco, Fa. LUNOS GmbH, Richtungswechsel der Volumenströme alle 70 s). Im Nordosten und Nordwesten grenzt der Raum an benachbarte Gebäudeteile (Flur und Büroräume) an. Die beiden Außenwände liegen in südöstlicher und südwestlicher Richtung. Eine Raumseite (in südöstlicher Richtung) ist dabei komplett verglast und unterteilt in neun Fenstersegmente. Ein Fenster kann in der Fensterfront ganz geöffnet werden und zwei Fenster in Kippstellung gebracht werden. Lufteinlass und Luftauslass der Lüftung liegen an der südwestlichen Seite (Regalseite) des Raumes. Diese grenzt an einen Innenhof, der die Lüftungsgeräte vor Wind schützt. Das Volumen des Raumes nach Bauplan beträgt 41,5 m^3. Als effektives Volumen des Büroraumes wurde 39,9 m^3 bestimmt und für alle Berechnungen in diesem Bericht verwendet.

Abbildung 1: a) Foto des Büroraumes in südöstlicher Richtung mit Blick auf die Fensterfront; b) Grundriss mit Länge, Breite und der dazugehörigen Fläche des Büroraumes



Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

Vor Einbau der Lüftung wurde mittels Blower-Door-Test die Dichtigkeit des Raumes überprüft. Allfällige undichte Stellen mit Ausnahme des Türrahmens und der Fensterflügel wurden abgedichtet. Die im Raum gemessenen Werte zum Luftaustausch beziehen sich daher streng genommen nicht auf die wahre Außenluft-Luftwechselrate, sondern beinhalten auch Beiträge durch den Luftaustausch mit angrenzenden Bereichen des Gebäudes. In Roulet 2002 wird hierfür die Begrifflichkeit der „equivalent outdoor airflow rate“ eingeführt, die den Außenluft-Luftwechsel beschreibt, der in der gemessenen Tracergaskonzentration ohne interzonale Luftflüsse resultieren würde. In unserem Messaufbau liegen die Ergebnisse bei ausgeschalteter und abgeklebter Lüftung (benannt Stufe 0) bei 0,10 bis 0,15 h^{-1} und beinhalten sowohl die Infiltration durch die Gebäudehülle als auch von angrenzenden Zonen. Der Anteil durch interzonalen Austausch ist daher als sehr gering einzuschätzen und zudem für alle Mess-Szenarien gleichbleibend. Die Ergebnisse in diesem Bericht werden daher vereinfachend als Luftwechselrate (LWR) bezeichnet und im Ein-Zonen-Ansatz bestimmt.

Das Lüftungsgerät kann in 5 Stufen betrieben werden, ausgeschaltet (Stufe 0, hier wurden zusätzlich die raumseitigen Lüftungsteile abgeklebt) und auf Stufe 1 bis 4. In Tabelle 4 sind die vom Hersteller genannten Volumenströme sowie die daraus berechneten theoretischen Luftwechselraten zusammengefasst. Zur Variabilität resp. Genauigkeit der Luftvolumenströme liegen von Herstellerseite keine Informationen vor. Mit angegeben sind erste Vergleichsmessungen der Luftwechselraten, die mittels Konzentrations-Abklingmethode und SF_6 als Tracergas durchgeführt wurden. Die Messungen wurden gemäß VDI 4300, Blatt 7, ausgeführt. Die Messdauer betrug 30 Minuten. Ausgewertet wurden die Messungen über die Zweipunktmethode (Abfall von Start- auf Endkonzentration) ohne weitere Optimierung des Auswertezeitraums.

Tabelle 4: Volumenströme und theoretische Luftwechselraten im Realraum mit technischer Lüftung

Lüftungsstufe	Volumenstrom Lüftung [m^3/h]	Theoretische LWR [h^{-1}]	Erste Messung LWR [h^{-1}]
Stufe 0	0	0	0,09
Stufe 1	15	0,38	0,39
Stufe 2	20	0,50	0,45
Stufe 3	30	0,75	0,78
Stufe 4	38	0,95	1,12

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Herstellerangaben und eigenen Messungen

Die Luftwechselraten für Stufe 1 und 2 liegen sehr eng zusammen, auch eine Nachjustierung konnte die Luftwechselrate für Stufe 1 nicht weiter reduzieren, so dass für das Projekt die Lüftungsstufen 0, 1, 3 und 4 gewählt wurden.

Für Messungen im Realraum mit Lüftungsstufen 1, 3 und 4 wurden die theoretischen Luftwechselraten als Referenzwerte verwendet. Beachtet werden muss dabei, dass die Schwankungsbreite des Lüftungsgeräts nicht bekannt ist und wie oben erwähnt die gemessenen Luftwechselraten einen Anteil durch Luftaustausch mit den angrenzenden Bereichen beinhalten. Dennoch zeigen bereits die ersten Messergebnisse, dass die geforderten vier unterschiedlichen Luftwechselraten für die Realraumversuche ausreichend genau über die Lüftung eingestellt werden können. Der Luftaustausch kann daher weitestgehend kontrolliert über das Lüftungsgerät sowie über Fenster und Türen gesteuert werden.

3.2 Passive Emissionsmethode – Materialien, Durchführung, Auswertung und Qualitätssicherung

3.2.1 Herstellung konstant emittierender Emissionsröhrchen für Tracergase Hexafluorbenzol, Perfluortoluol und Perfluordecalin

Emissionsröhrchen nach VDI 4300 Blatt 7 (Permeation)

Für alle eingesetzten Tracergase wurden Emissionsröhrchen in Anlehnung an VDI 4300 Blatt 7 hergestellt (Bezeichnung Emissionsröhrchen mit der Abkürzung DR und fortlaufender Nummerierung). Die Permeationsgläschen wurden in Thermoskannen aufbewahrt, die im unteren Bereich mit 20 °C warmen Wasser befüllt wurden. Diese wurden mit Korkstopfen verschlossen, die von den Permeationsröhrchen durchstoßen werden. Zusätzlich wurden Öffnungen für ein Flüssigkeitsthermometer in den Stopfen gebohrt, um die Temperatur überwachen zu können. Die Messung der Temperatur in der Themoskanne ergab, dass auch in der Thermoskanne Temperaturschwankungen auftreten.

Dennoch konnten für Hexafluorbenzol und Perfluortoluol auf diese Weise konstant emittierende Röhrchen hergestellt werden. Exemplarisch sind die Emissionsraten von DR0 und DR2 hier aufgelistet:

- HFB Emissionsrate DR0 in Thermoskanne 240 µg/h, RSD 2 %
- HFB Emissionsrate DR0 ohne Thermoskanne in klimatisiertem Gebäude 236 µg/h, RSD 4 %
- OFT Emissionsrate DR2 ohne Thermoskanne in klimatisiertem Gebäude 149 µg/h, RSD 7 %
- OFT Emissionsrate DR2 ohne Thermoskanne in Prüfkammer 154 µg/h, RSD 8 %

Für Perfluordecalin konnte in diesem Aufbau keine Konstanz erreicht werden (DR9 9 µg/h, RSD 55 %; DR6 16 µg/h, RSD 70 %).

Emissionsröhrchen nach Shinohara 2010 (Diffusion)

Um auch für PFD geeignete Emissionsquellen zu erhalten, wurde eine weitere Quellengeometrie in Anlehnung an Shinohara 2010 ausgewählt. Der Aufbau von Shinohara wurde etwas vereinfacht umgesetzt. Die Tracerflüssigkeit wurde in ein Vial gefüllt und dieses mit einem Septum verschlossen. Als Diffusionsröhrchen wurde eine Kanüle eingesetzt, mit der das Septum durchstochen wurde (Bezeichnung Emissionsröhrchen mit der Abkürzung SV und fortlaufender Nummerierung). Auf diesem Wege konnten auch für Perfluordecalin konstant emittierende Quellen hergestellt werden, wobei die Emissionsraten hier jedoch sehr niedrig waren (vgl. Tabelle 5).

Eingesetzt wurde dieser Aufbau (abgekürzt SV) in den Prüfkammermessungen der Validierung sowie im Realraum für alle Substanzen bei Lüftungsstufe 0 und 1 sowie bei Messung mit geschlossenem

Fenster (8 h ungelüftet). Für HFB und OFT wurde dieser Aufbau zusätzlich in allen weiteren Realraumversuchen eingesetzt.

Emissionsröhrchen Certan® (Diffusion)

Da die Emissionsraten für PFD weiterhin sehr niedrig waren, wurden als dritte Variante Quellen aus Kapillarhalsgläschen (Certan®) hergestellt (Bezeichnung Emissionsröhrchen mit der Abkürzung CT und fortlaufender Nummerierung). Auch für diesen Aufbau konnten konstant emittierende Quellen realisiert werden (vgl. Tabelle 5).

Vergleich der Emissionsröhrchen und Verwendungszyklus

In Abbildung 2 sind alle evaluierten Emissionsquellen dargestellt (die Glasvials wurden nur für PFN verwendet vgl. Kapitel 0).

Abbildung 2: PFT-Emissionsquellen verschiedener Geometrie (DR, SV, Certan®, Glasvial 2 mL und 9 mL (nur für Feststoff PFN))

Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

Die Emissionsraten der Emissionsröhrchen wurden fortlaufend bestimmt, indem die Gewichtsabnahme bezogen auf die Zeit gemessen wurde. Die Wägungen erfolgten regelmäßig über mehrere Tage. Für den Validierungsteil wurden die tagesaktuellen Emissionsraten verwendet. Da sich über den Verlauf des Projektes herausgestellt hat, dass der Wägefehler signifikant ausfallen kann, wurden im weiteren Projektverlauf Mittelwerte für die Emissionsröhrchen über ihren Verwendungszyklus bestimmt und für die Auswertung eingesetzt (siehe Tabelle 5). Werden die gemittelten Emissionsraten mit den Temperaturen am Messtag verglichen, so zeigt sich, dass der Temperaturverlauf und die Entwicklung der Emissionsraten übereinstimmen (siehe Quelle: Eigene Daten

Abbildung 3). Somit kann davon ausgegangen werden, dass die gemittelten Emissionsraten repräsentativ für die jeweiligen Messungen sind.

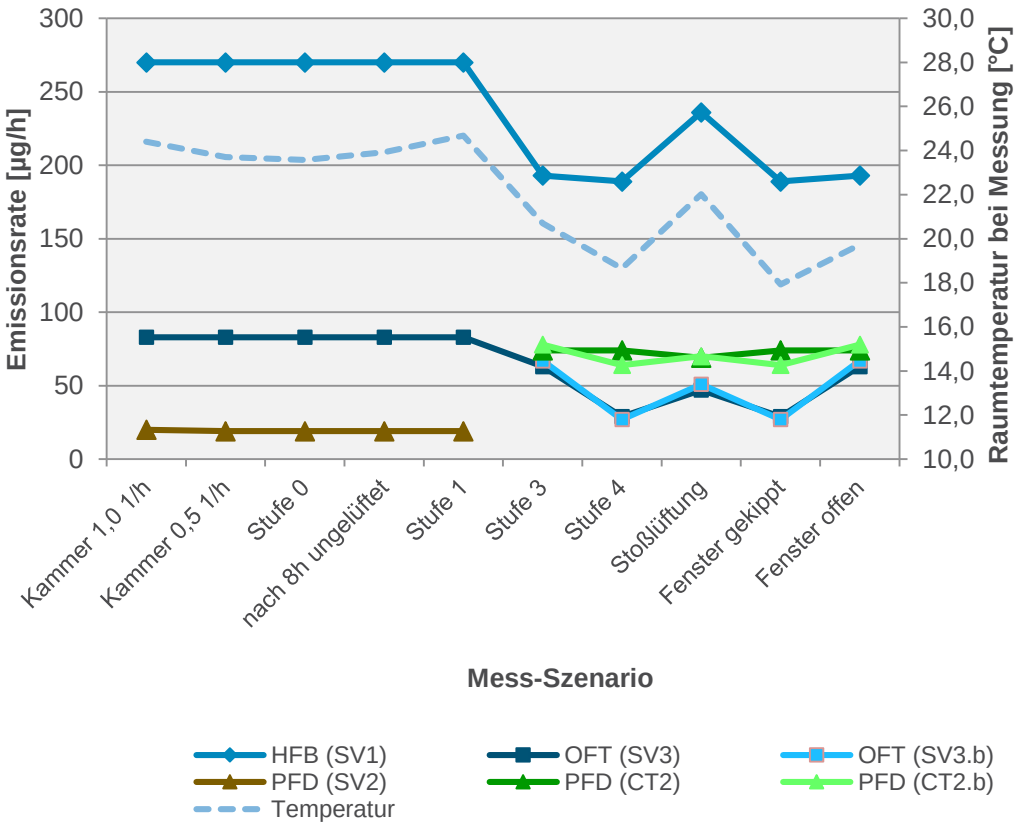
Ein Vergleich der Emissionsraten (ER) zwischen den verschiedenen Geometrien (vgl. Tabelle 5) zeigt für die Certan-Quellen (Abkürzung CT) eine drei- bis vierfach höhere Emissionsrate als mit dem Aufbau angelehnt an Shinohara (Quellengeometrie SV). Daher wurde dieser Aufbau für die Substanz PFD ab Lüftungsstufe 3 und bei Fensterlüftung eingesetzt.

Tabelle 5: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten (ER) der verwendeten Emissionsröhrchen mit RSD

Mess-Szenario	HFB ER SV1 [µg/h] (RSD %)	OFT ER SV3 [µg/h] (RSD %)	OFT ER SV3.b [µg/h] (RSD %)	PFD ER SV2 [µg/h] (RSD %)	PFD ER CT2 [µg/h] (RSD %)	PFD ER CT2.b [µg/h] (RSD %)
Kammer 1,0 h^{-1}	270 (6)	83 (11)	n. a.	20 (32)	n. a.	n. a.
Kammer 0,5 h^{-1} / nach 8 h ungelüftet	270 (6)	83 (11)	n. a.	19 (31)	n. a.	n. a.
Stufe 0 / 1	270 (6)	83 (11)	n. a.	19 (30)	n. a.	n. a.
Stufe 3 / Fenster offen	193 (16)	63 (16)	67 (7)	n. a.	74 (11)	78 (8)
Stufe 4 / Fenster gekippt	189 (8)	29 (1)	27 (10)	n. a.	74 (23)	64 (22)
Stoßlüftung	236 (16)	47 (46)	51 (20)	n. a.	69 (12)	70 (14)

Quelle: Eigene Daten

Abbildung 3: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten der verwendeten Emissionsröhrchen im Vergleich zur Raum- bzw. Kammertemperatur am Messtag



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

3.2.2 Aufbau und Validierung der Analytik für Hexafluorbenzol, Perfluortoluol, Perfluordecalin

Substanzen

Hexafluorbenzol 99%	Sigma Aldrich
Perfluortoluol 98%	Alfa Aesar
Perfluordecalin 95%	Sigma Aldrich
Toluol-d8	Dr. Ehrenstorfer GmbH
Methanol	VWR Prolabo Chemicals
TENAX® Porous Polymer Adsorbent	Supelco
CarbopackTM Adsorbent	Supelco

Geräte

BiVOC2 Membranpumpe	Holbach GmbH
Analysenwaage ALC-110.4	Acculab
TD-GC-MS1/TD-GC-MS2	Shimadzu
GC-MS-QP2010 Plus	Shimadzu
Mikrolitерspritzen 0,5 µL/1µL	HAMILTON, SGE Analytical Science
2mL Autosampler Vials mit 11mm Rollrand	WICOM GmbH
11mm Alu-Crimp Kappen mit PTFE/Silikon Septum	WICOM GmbH
11mm Alu-Crimp Kappen mit Butylgummi/PTFE Septum	WICOm GmbH
Eppendorf Research 2100 Kolbenhubpipetten 100µL	Eppendorf AG
Eppendorf Reference Kolbenhubpipetten 10µL/ 1000µL	Eppendorf AG
Sterican Einmal-Injektionskanüle 0,4x20mm	B.Braun
Sterican Einmal-Injektionskanüle 0,7x30mm	B.Braun

Probenahme und Berechnung der Luftwechselraten in der Validierung

Messung und Auswertung der passiven Emissionsmethode mit HFB, OFT und PFD erfolgten basierend auf VDI 4300 Blatt 7 angepasst auf die konkrete Fragestellung.

Für Validierungsparameter, die in Kammer- oder Realraummessungen evaluiert wurden, wurde wie folgt vorgegangen: Die Emissionsröhrchen (Aufbau SV) wurden vor der Messung in den Messraum eingebracht. Im Realraum wurden die Emissionsquellen in einem Vial Ständer auf Tischhöhe positioniert. In der Kammer wurden die Emissionsröhrchen in einem Vial-Ständer mittig auf dem Kammerboden platziert. Die Zeitspanne zwischen Einbringen der Röhrchen und Probenahme variierte je nach Validierungsfragestellung (siehe 3.2.2.1 bis 3.2.2.7). Die Probenahme erfolgte aktiv mit BIVOC2-Pumpen (Fa. Holbach GmbH) in Doppelbestimmung. Hierfür wurde Innenraumluft für 10 Minuten mit einer Durchflussrate von 0,2 L/min durch Doppelbettröhrchen geleitet (Probenluftvolumen 2 L). Abweichend von VDI 4300 Blatt 7 wurden Doppelbettröhrchen mit Tenax® TA und Carbopack™ X eingesetzt. Diese Kombination wurde an der Bremer Umweltinstitut GmbH entwickelt (Llamas2002). Da die gewählten Tracergase schlecht anhaftend sind, ist davon auszugehen, dass diese mit einem zweiten

Adsorbens effizienter gesammelt werden können. Der Probenahmezeitpunkt ergibt sich aus den Validierungsparametern. Kammerproben wurden jeweils über Schläuche aus der Kammer entnommen, die Probenahme im Realraum erfolgte in der Raummitte ca. 2 m von den Emissionsquellen entfernt.

Die Luftwechselraten wurden aus den gemessenen Gehalten der Sammelröhrchen wie folgt berechnet:

Formel 1: Berechnung der Luftwechselraten aus Analytkonzentrationen TD-GC/MS

$$\mathrm{LWR}\left[h^{-1}\right] = \frac{\mathrm{Emissionsrate}_{\mathrm{Analyt}}\left[\frac{\mu g}{h}\right]}{\mathrm{Raumvolumen}_{\mathrm{effektiv}}\left[m^3\right] \cdot \mathrm{Analytkonzentration}_{\mathrm{Raumluft}}\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]}$$

mit

$$\mathrm{Analytkonzentration}_{\mathrm{Raumluft}}\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = \frac{\mathrm{Analytgehalt}_{\mathrm{Probe}}\left[\mu g\right]}{\mathrm{Probenluftvolumen}\left[m^3\right]}$$

Die Emissionsraten für die Auswertungen im Validierungsteil wurden jeweils durch Wiegen der Emissionsquellen vor und nach der Messung für den Messzeitraum bestimmt.

Geplant war zunächst die Konzentrationen für HFB parallel zur Probenahme auf Doppelbettröhrchen auch mittels Direktanzeige auf dem photoakustischen Monitor Innova 1312 zu bestimmen. Ein erster Vergleich zwischen der chemisch-analytischen Auswertung und der Konzentrationsmessung mit dem Innova 1312 ergab jedoch eine deutliche Überschätzung der HFB-Konzentration bei Messung mit dem Innova 1312 im gewählten Versuchsaufbau (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleich HFB-Konzentrationen mittels Innova 1312 und PFT-Methode

Mess-Szenario	Konzentration HFB Sollwert[a)] [µg/m³]	Konzentration HFB PFT-Methode [µg/m³]	Konzentration HFB Innova [µg/m³]
Kammer LWR 1 h^{-1}	270	263	336
Lüftungsstufe 0	52	46	260

Quelle: Eigene Daten

a) Der Sollwert für die Kammermessung wurde aus eingestellter LWR, Emissionsrate von SV1 und Kammervolumen berechnet. Der Sollwert für Lüftungsstufe 0 wurde aus gemessener LWR mit SF_6, Emissionsrate von SV1 und effektivem Raumvolumen 39,9 m³ berechnet.

Analytische Methode

Die analytische Methode wurde in Anlehnung an VDI 4300 Blatt 1 basierend auf einer TD-GC/MS-Methode entwickelt. Folgende Parameter wurden gewählt:

- TD bei 250 °C
- GC-Säule: rxi-5sil ms
- GC-Trägergas: He
- GC-Flussrate: 2,47 ml/min
- GC-Temperaturgradient von 35 °C bis 320 °C (35/110/225/300/320)
- MS: ausgwertete Massen: HFB (186, 117, 93), OFT (217, 236, 186), PFD (293, 243, 343)

- MS-Tuning: Kalibrierung mit der Substanz Tris(perfluor-n-Butyl)amin auf folgende Massen: 69, 219 und 502

Erste Kalibrierungen haben deutliche Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Perfluoroctan aufgezeigt. Da die Substanz nahezu in der Totzeit eluiert, konnte keine Linearität in der Kalibrierung erreicht werden (siehe Abbildung 4). Aus diesem Grund und wegen unzureichender Daten zur. gesundheitlichen Bewertung wurde als Alternative Perfluordecalin eingeführt, da durch die zyklische Struktur Vorteile in der Analytik zu erwarten sind, während die Substanz in ähnlichen Anwendungen wie PFO eingesetzt wird (siehe Abbildung 5).

Abbildung 4: Kalibriergerade PFO, nicht-linear

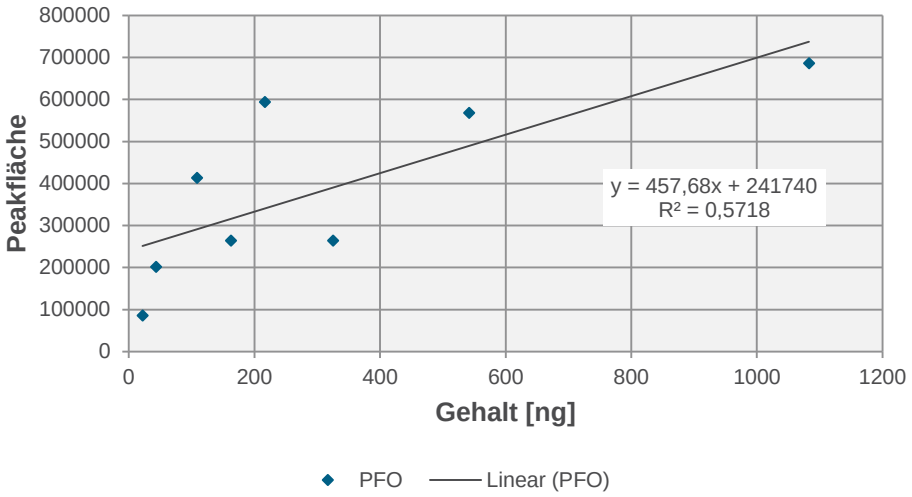
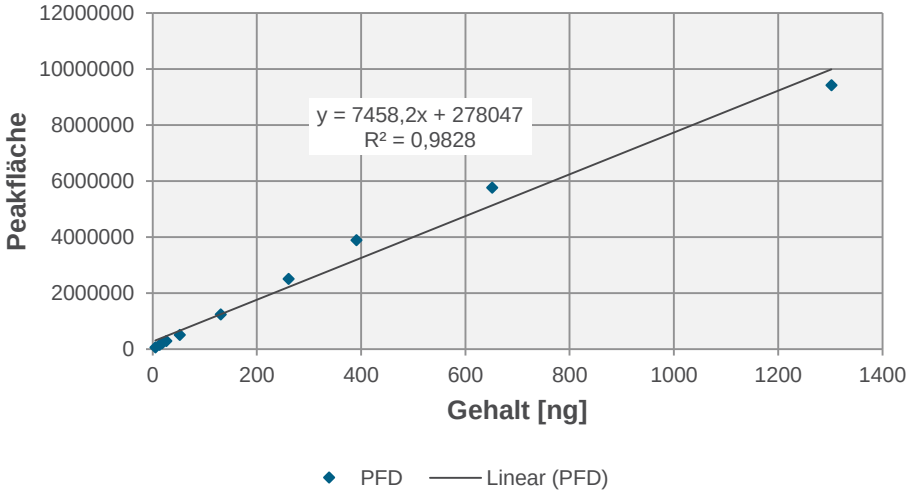


Abbildung 5: Kalibriergerade PFD



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Die Analytik der verbleibenden Substanzen HFB, OFT und PFD wurde validiert. Die Validierung umfasste folgende Punkte:

- Richtigkeit (Wiederfindung Labor und Kammer)
- Präzision (Wiederholpräzision Labor und Kammer, Laborpräzision Labor)
- Selektivität/Spezifität (Selektivität Labor und Spezifität Realraum)

- Linearität (Labor)
- Nachweis- und Bestimmungsgrenze (Labor)
- Robustheit (Lagerung und Variation LWR Kammer)

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Validierung dargestellt.

3.2.2.1 Richtigkeit

Labor:

Für jede Substanz wurden dreifach Messungen für je drei Konzentrationsbereiche durchgeführt (10, 50 und 500 µg/m³). Hierfür wurden pro Konzentration drei Sammelröhrchen mit einer definierten Menge der Substanzen dotiert. Die benötigte Substanzmenge wurde aus der angestrebten Luftkonzentration unter Annahme von 2 L Probenluftvolumen berechnet. Dotiert wurde aus einer Standardlösung, die alle drei Komponenten enthält. Berechnet wurden die Wiederfindungsraten, die sich aus aufgebrachter Substanzmenge und gemessener Substanzmenge ergeben. Ziel waren Wiederfindungsraten zwischen 75 % und 125 %.

Die einzelnen Wiederfindungsraten lagen zwischen 74 % und 109 %. Gemittelt über die dreifache Messung pro Substanz ergaben sich gemittelte Wiederfindungsraten von 83-98 % für HFB, 84-100 % für OFT und 84-94 % für PFD.

Kammer:

Für jede Substanz wurde ein SV in eine 1 m³-Glaskammer bei einem definierten Luftwechsel von 1 h^{-1} eingebracht. Mittels aktiver Probenahme auf Sammelröhrchen (s.o.) wurden Luftproben nach 1, 4, 8 und 25 Stunden entnommen. Es wurden zwei Probenahmen mit Doppelproben durchgeführt, also vier Sammelröhrchen pro Zeitpunkt und Substanz eingesetzt. Berechnet wurde die Wiederfindungsrate, indem die theoretische Kammerkonzentration je Substanz aus der Emissionsrate, dem Luftwechsel und dem Kammervolumen bestimmt wurde und mit der analytisch bestimmten Konzentration verglichen wurde. Auch hier sollten Wiederfindungsraten zwischen 75 % und 125 % erreicht werden.

Für die Probenahme nach einer Stunde konnten für keine Substanz ausreichend hohe Wiederfindungen bestimmt werden (64-66 %). Für die Probenahmen nach 4, 8 und 25 Stunden lagen alle Wiederfindungsraten im angestrebten Bereich (HFB: 86-88 %; OFT: 86-89 %; PFD: 85-91 %).

3.2.2.2 Wiederholpräzision

Labor:

Um die Wiederholpräzision zu bestimmen, wurden fünf Sammelröhrchen mit jeweils der gleichen Menge Standard (Standardlösung mit allen drei Substanzen) dotiert und gemessen. Berechnet wurde die relative Standardabweichung (RSD) pro Substanz. Das Akzeptanzkriterium wurde auf RSD ≤ 10 % festgelegt.

Die relativen Standardabweichungen lagen für HFB bei 8 %, für OFT bei 6 % und für PFD bei 14 %.

Kammer:

Für jede Substanz wurde ein SV in eine 1 m³-Glaskammer bei einem definierten Luftwechsel von 1 h^{-1} eingebracht. Nach ausreichender Equilibrierzeit wurden jeweils im Abstand von 30 min dreimal Doppelproben aus der Kammerluft entnommen. Berechnet wurde die relative Standardabweichung pro Substanz. Das Akzeptanzkriterium wurde auf RSD ≤10 % festgelegt.

Bei einer Probe lag der interne Standard außerhalb des Akzeptanzbereichs, diese Probe konnte daher nicht mit bewertet werden. Die relativen Standardabweichungen über die 5 verbleibenden Proben lagen bei 3 % für HFB, 5 % für OFT und 5 % für PFD.

3.2.2.3 Laborpräzision

Zur Bestimmung der Laborpräzision wurden von zwei Bearbeitern an zwei unterschiedlichen Tagen jeweils 3 Konzentrationen als Doppelproben angesetzt und auf verschiedenen Geräten gemessen und ausgewertet. Ausgewertet wurden die Wiederfindungsraten bezogen auf die Mittelwerte über beide Bearbeiter pro Substanz (4 Werte, jeweils eine Doppelprobe pro Bearbeiter, Substanz und Konzentration) sowie die relativen Standardabweichungen hierzu.

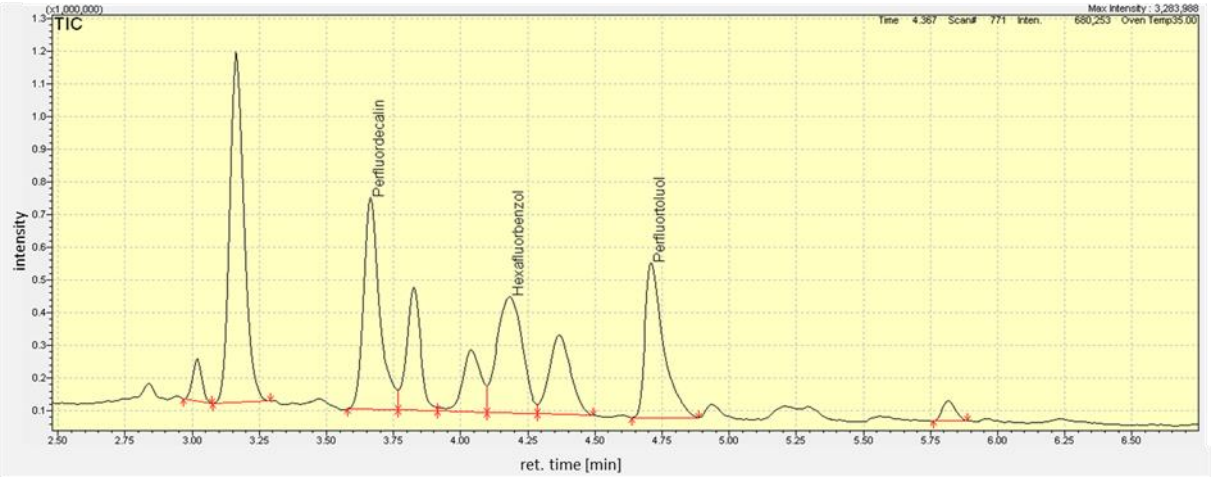
Die relativen Standardabweichungen lagen zwischen 4 % und 18 %, die Wiederfindungsraten zwischen 81 % und 92 %.

3.2.2.4 Selektivität/Spezifität

Selektivität (Labor):

Um die Selektivität der Methode zu überprüfen, wurden im oberen und unteren Konzentrationsbereich jeweils Doppelproben aus der Standardlösung angesetzt und gemessen (siehe Abbildung 6). Die Bewertung, ob die einzelnen Substanzen im Chromatogramm ausreichend getrennt und integrierbar sind, erfolgte durch den Bearbeiter in der Auswertungssoftware.

Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Selektivität im unteren Konzentrationsbereich (Probe F336-101)

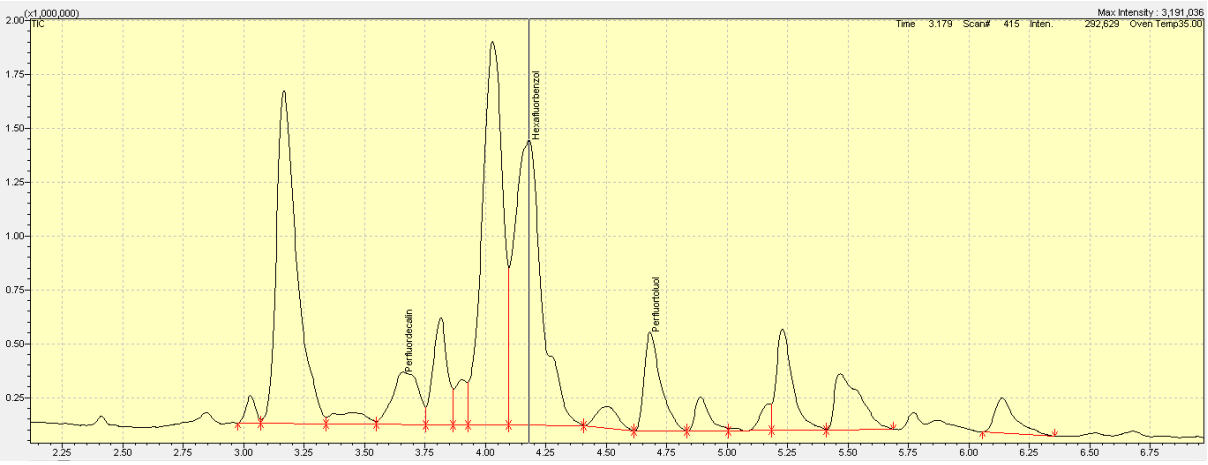


Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

Spezifität (Realraum):

Zum Nachweis der Spezifität wurden jeweils zwei Realraumproben bei Lüftungsstufe 0 und zwei Proben bei Lüftungsstufe 3 entnommen und bewertet (siehe Abbildung 7). Die Bewertung, ob die einzelnen Substanzen im Chromatogramm ausreichend getrennt und integrierbar sind, erfolgte durch den Bearbeiter in der Auswertungssoftware.

Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Spezifität im Realraum bei Lüftungsstufe 0 (Probe F341-10)

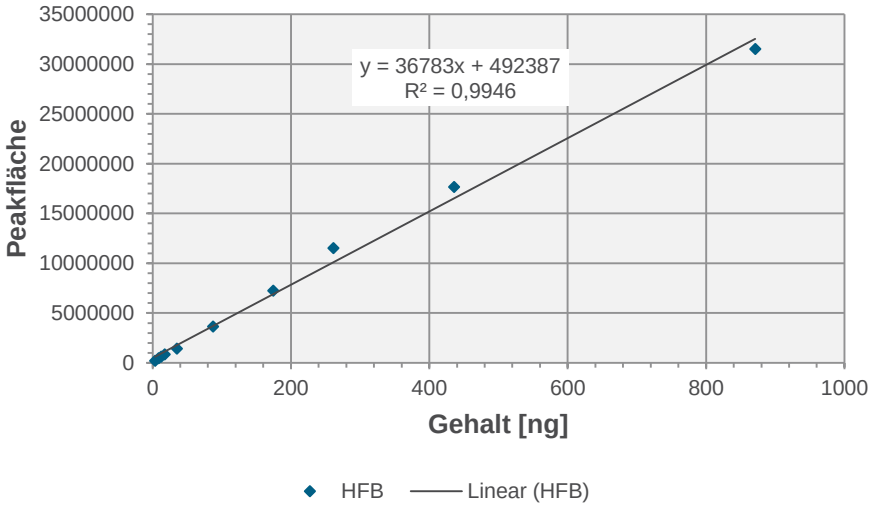


Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

3.2.2.5 Linearität

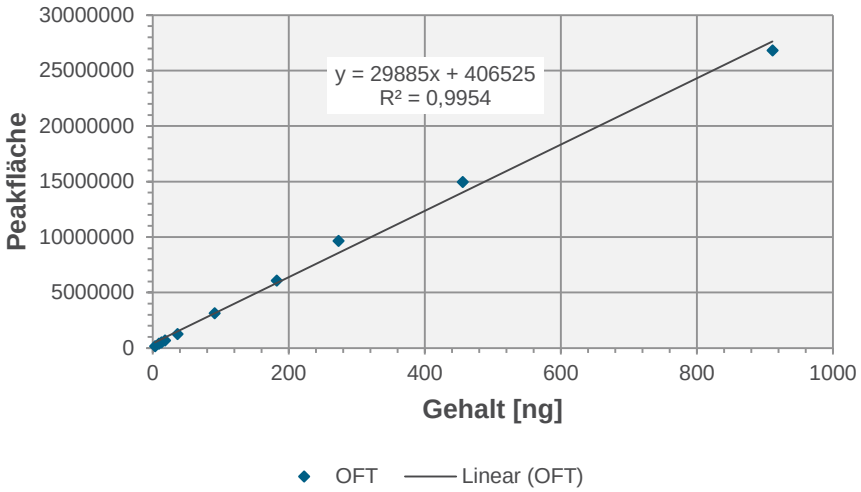
Linearität und Arbeitsbereich wurden in insgesamt drei Kalibrierungen bestimmt und festgelegt. Hierzu wurden auf Gerät TD3 eine Zehnpunkt- und eine Fünfpunktkalibrierung durchgeführt. Auf TD2 wurde eine Fünfpunktkalibrierung durchgeführt. Zusätzlich wurde der interne Standard Toluol-d8 kalibriert. Ziel waren Korrelationskoeffizienten von > 0,980 bei linearer Regression der Datenpunkte in einem Arbeitsbereich von 2 bis 650 µg/m³. Die Zehnpunktkalibrierung auf Gerät TD3 sowie die Kalibrierung des internen Standards sind in Abbildung 8 bis Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 8: Zehnpunkt-Kalibrierung von HFB auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980)



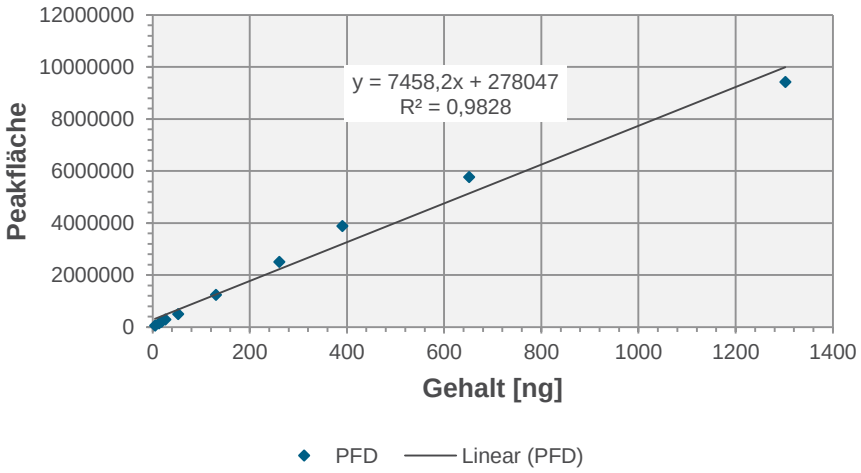
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 9: Zehnpunkt-Kalibrierung von OFT auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980)



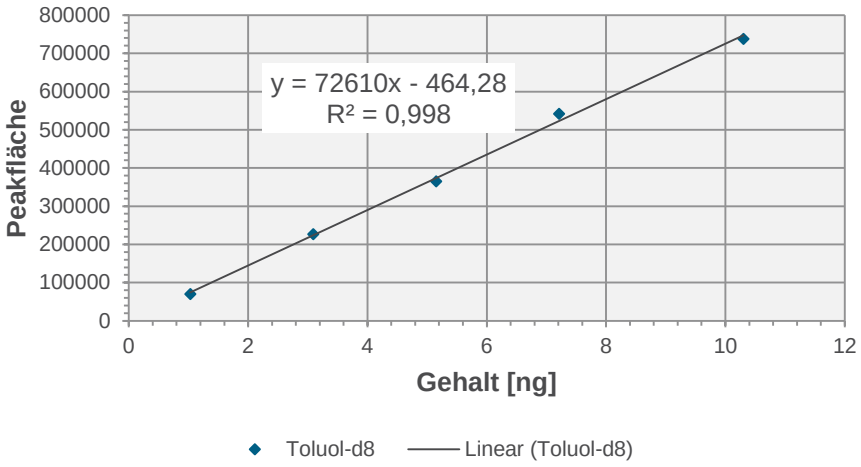
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 10: Zehnpunkt-Kalibrierung von PFD auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980)



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 11: Fünfpunkt-Kalibrierung des internen Standards Toluol-d8 auf Gerät TD3 (Akzeptanzkriterium: Bestimmungsgrad >0,980)



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

3.2.2.6 Nachweis- und Bestimmungsgrenze

Zur Bestimmung der Nachweisgrenze bzw. der Bestimmungsgrenze wurde eine Verdünnungsreihe ausgehend vom untersten Kalibrierpunkt im Labor angefertigt und gemessen. In den erhaltenen Chromatogrammen wurde das Signal zu Rausch Verhältnis bestimmt. Als Akzeptanzkriterium wurde für die Nachweisgrenze ein Signal zu Rausch Verhältnis zwischen 3:1 und 2:1 festgelegt und für die Bestimmungsgrenze ein Signal zu Rausch Verhältnis von 10:1.

Die ermittelten Nachweisgrenzen betragen 0,09 µg/m^3 für HFB, 0,06 µg/m^3 für OFT und 0,09 µg/m^3 für PFD. Die Bestimmungsgrenzen liegen bei 0,16 µg/m^3 für HFB, 0,15 µg/m^3 für OFT und 0,62 µg/m^3 für PFD.

3.2.2.7 Robustheit

Einfluss von Lagerungsdauer und –temperatur auf Prüfkammerproben

Um die Robustheit bzgl. Lagerungsdauer und –temperatur zu bestimmen, wurden drei Doppelproben aus einer 1 m^3-Kammer bei einem eingestellten Luftwechsel von 1 h^{-1} entnommen. Von den drei Doppelproben wurden zwei sieben Tage bei Raumtemperatur gelagert, zwei weitere vierzehn Tage bei Raumtemperatur und die zwei verbleibenden Proben wurden sieben Tage bei 8°C gelagert. Für jede Probe wurde die Wiederfindungsrate berechnet. Als Akzeptanzkriterium wurde eine Wiederfindungsrate zwischen 75-125 % festgelegt.

Da das Emissionsröhrchen gefüllt mit PFD eine überdurchschnittliche Emissionsrate für den Versuchstag ergab, wurde die durchschnittliche Emissionsrate für das Röhrchen für die Berechnung der Wiederfindungsrate verwendet.

Nach sieben Tagen Lagerung bei Raumtemperatur wurden Wiederfindungsraten von 97 % für HFB, 104 % für OFT und 115 % für PFD bestimmt. Die Proben, die vierzehn Tage bei RT gelagert wurden, zeigten WFR von 96 % für HFB, 102 % für OFT und 120 % für PFD. Nach Lagerung für sieben Tage bei 8°C ergaben sich folgende Wiederfindungsraten: 96 % für HFB, 106 % für OFT und 110 % für PFD.

Einfluss von eingestellter Luftwechselrate auf Prüfkammerproben

In einer 1m^3-Prüfkammer wurden zwei Luftwechselraten eingestellt (0,5 h^{-1} und 1,0 h^{-1}). Für beide Luftwechselraten wurden Doppelproben für alle drei Substanzen entnommen. Aus den gemessenen

Konzentrationen, dem Kammervolumen und den gemessenen Emissionsraten wurde der Luftwechsel für jede Probe und Substanz bestimmt. Die relative Standardabweichung der Luftwechselraten wurde für beide eingestellten LWR berechnet (RSD über 6 Werte, 2 Proben mit je drei Substanzen). Die RSD sollte <10 % betragen.

Für einen voreingestellten Luftwechsel von 0,5 h^{-1} betrug die RSD 6 %, bei einem Luftwechsel von 1,0 h^{-1} betrug die RSD 9 %.

3.2.2.8 Zusammenfassung Validierung

Die Wiederfindungsraten lagen für dotierte Proben zwischen 74 und 109 %, für Kammerproben zwischen 85 und 91 %. Die Richtigkeit im angestrebten Bereich (75-125 %) konnte für die angewandte Methode gezeigt werden. Bei dotierten Proben muss auf die schlechte Löslichkeit von PFD geachtet werden.

Die Wiederholpräzision lag für dotierte Proben <14 % und für Kammerproben bei <5 %. Die Wiederholpräzision für die angewandte Methode wurde damit nachgewiesen (RSD <10 %). Bei dotierten Proben muss weiterhin von einer erhöhten Fehleranfälligkeit ausgegangen werden.

Die Laborpräzision lag mit <18 % außerhalb des angestrebten Akzeptanzkriteriums (RSD <10 %). Da bereits die Wiederholpräzision für dotierte Proben mit <14 % oberhalb des Akzeptanzkriteriums lag, ist von einem kombinierten Einfluss durch Fehleranfälligkeit beim Dotieren sowie Effekten durch Gerät und Bearbeiter auszugehen. Zur Reduktion von Einflüssen sollten Proben einer Messreihe gemeinsam und auf einem Gerät gemessen werden.

Spezifität und Selektivität der Methode konnten jeweils für niedrige und hohe Konzentrationsbereiche gezeigt werden.

Der angestrebte Arbeitsbereich von 2–650 µg/m^3 konnte durch ausreichend hohe Korrelationskoeffizienten bestätigt werden. 650 µg/m^3 ist jedoch als Obergrenze anzusehen, da alle Kalibrierpunkte für die höchste Konzentration bereits unterhalb der Kalibriergeraden liegen.

Als Bestimmungsgrenzen wurden für die drei Substanzen Werte zwischen 0,15 und 0,62 µg/m^3 gefunden. Die Nachweisgrenzen liegen zwischen 0,06 und 0,09 µg/m^3.

Bzgl. Lagerungsdauer und –temperatur bereits entnommener Luftproben konnte die Robustheit der Methode für Lagertemperaturen von 8 °C und RT für eine Lagerdauer von sieben resp. 14 Tage gezeigt werden.

Die eingestellte Luftwechselrate in der Prüfkammer beeinflusst die Streuung der Ergebnisse. Mit 9% liegt die relative Standardabweichung bei 1 h^{-1} höher als bei einem Luftwechsel von 0,5 h^{-1} (RSD 6%). Grund hierfür ist die vergleichsweise niedrige Konzentration und Emissionsrate von Perfluordecalin in den Validierungsmessungen, die die Unsicherheit der Ergebnisse erhöht. Für die Anwendung der Methode muss daher auf ausreichend hohe Emissionsraten und Konzentrationen im Messraum geachtet werden.

3.2.3 Bestimmung Sättigungskurven der Tracergase Hexafluorbenzol, Perfluortoluol und Perfluordecalin

Wie sich bereits in der Validierung gezeigt hat (vgl. 3.2.2.1), muss für die PFT-Methode eine ausreichende Zeit für die Einstellung der Gleichgewichtskonzentration eingeplant werden. Um zu prüfen wie lange die Equilibrierzeit der PFT in Kammer und Realraum ist, wurden daher Sättigungskurven bestimmt. Die Messungen wurden sowohl in einer 1 m^3-Prüfkammer als auch im Realraum bei zwei Lüftungsstufen durchgeführt.

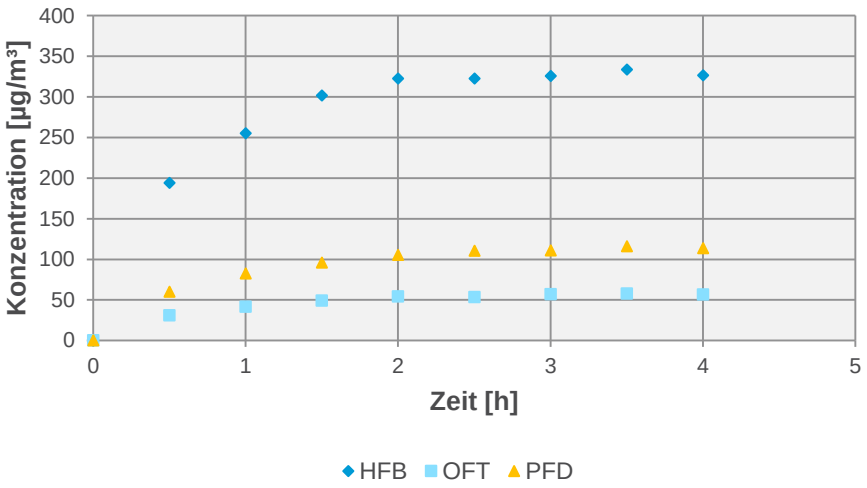
Im Prüfkammerversuch (voreingestellte LWR 1 h^{-1}) waren für alle drei PFT ca. 2 Stunden Equilibrierzeit notwendig. Im Realraum, in dem die weiteren Messungen geplant waren, waren je nach eingestellter Lüftungsstufe ebenfalls 2 Stunden (Lüftungsstufe 4, LWR berechnet nach Herstellerangaben 0,95 h^{-1}) respektive 4-6 Stunden notwendig (Lüftungsstufe 2, LWR berechnet nach Herstellerangaben 0,50 h^{-1}).

3.2.3.1 Prüfkammer

Die Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD wurden in einer 1 m^3-Prüfkammer bei einem voreingestellten Luftwechsel von 1 h^{-1} bestimmt. Über vier Stunden hinweg wurde jede halbe Stunde eine Probe entnommen, um den zeitlichen Verlauf der Kammerkonzentration zu evaluieren. Messaufbau und -ablauf wurden umgesetzt wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Die Auswertung erfolgte wie in 3.2.4 beschrieben.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, wurde die Sättigungskonzentration nach ca. 2 Stunden für alle drei PFT erreicht.

Abbildung 12: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD in einer 1 m^3 Prüfkammer bei eingestellter LWR von 1 h^{-1}



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

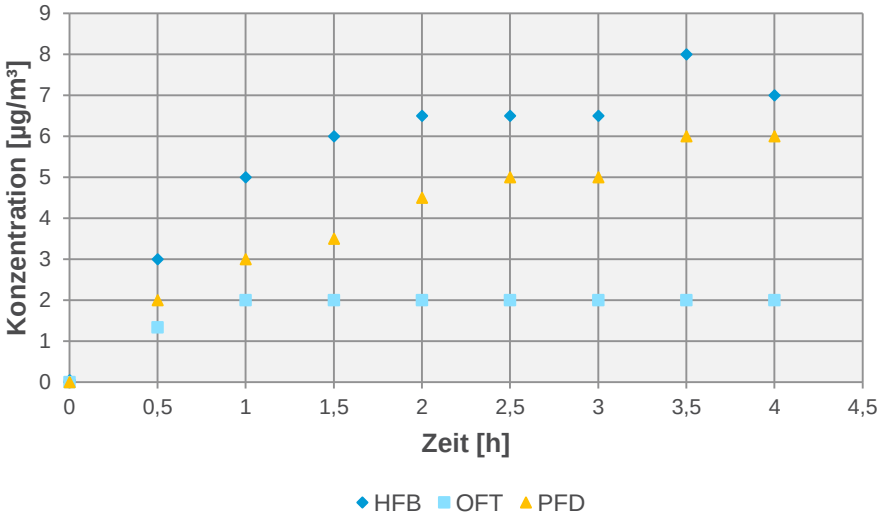
3.2.3.2 Realraum

Für HFB, OFT und PFD wurden Sättigungskurven im Realraum bei Lüftungsstufe 2 und 4 evaluiert. Für Lüftungsstufe 4 wurden wie im Kammerversuch über vier Stunden hinweg jede halbe Stunde eine Probe entnommen, um den zeitlichen Verlauf der Kammerkonzentration zu evaluieren. Da bei niedrigeren Luftwechselraten mit längerer Equilibrierzeit zu rechnen ist, wurde für Lüftungsstufe 2 die Versuchsdauer auf 9 Stunden mit stündlicher Probenahme verlängert.

Messaufbau und –ablauf wurden umgesetzt wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Die Auswertung erfolgte gemäß 3.2.4.

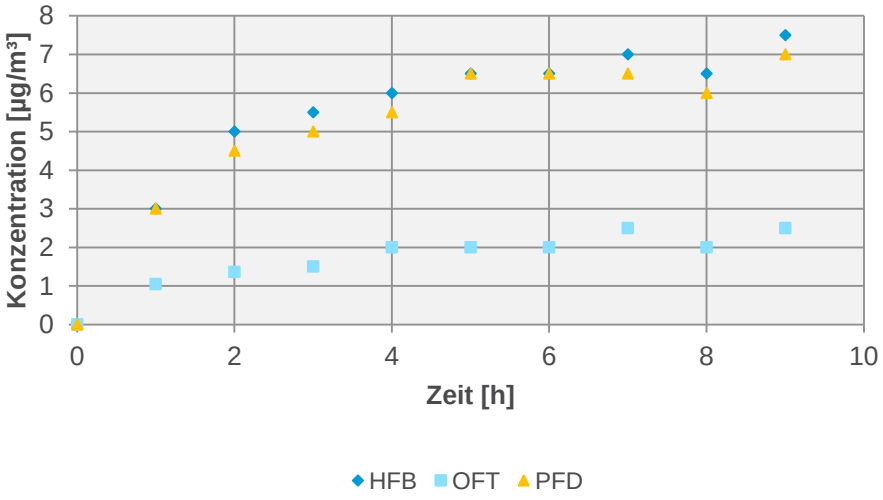
Aus Abbildung 13 und Abbildung 14 bestätigt sich, dass die Gleichgewichtskonzentration bei steigender LWR schneller erreicht wird. Für Stufe 4 wird die Sättigungskonzentration wie im Kammerversuch nach ca. 2 Stunden für alle drei Gase erreicht. Bei etwa halbierter LWR (Lüftungsstufe 2) werden ca. 4-6 Stunden zur Equilibrierung benötigt.

Abbildung 13: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD im Realraum bei Lüftungsstufe 4



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 14: Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD im Realraum bei Lüftungsstufe 2



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

3.2.4 Probenahme und Berechnung der Luftwechselraten im Realraum (passive Emissionsmethode)

Messung und Auswertung der passiven Emissionsmethode mit HFB, OFT und PFD erfolgten basierend auf VDI 4300 Blatt 7, angepasst auf die konkrete Fragestellung.

Die Emissionsröhrchen (Aufbau SV und CT) wurden mindestens acht Stunden vor der Messung in den Messraum eingebracht, in der Regel am Vorabend der Messung. Zu diesem Zeitpunkt wurde die für den Folgetag benötigte Lüftungsstufe eingestellt, um ausreichend Equilibrierzeit zu gewährleisten. Die Emissionsquellen wurden in einem Vial Ständer auf der Tischplatte des mittleren Schreibtischs positioniert (Höhe ca. 80 cm).

Die Probenahme erfolgte aktiv mit BIVOC2-Pumpen (Fa. Holbach GmbH) in Doppelbestimmung. Hierfür wurde Innenraumluft für 10 Minuten mit einer Durchflussrate von 0,2 L/min durch Doppelbett-

röhrchen geleitet (Probenluftvolumen 2 L). Abweichend von VDI 4300 Blatt 7 wurden Doppelbettröhrchen mit Tenax® TA und Carbopack™ X eingesetzt.

Die Pumpe für die Probenahme wurde etwa in gleicher Höhe wie die Emissionsquellen mit ca. 2 m Abstand vor dem mittleren Regal positioniert. Die Probenahme sollte optimalerweise vor dem Ausbringen der Gase für die Abklingmethode erfolgen, um Störungen durch die hierfür notwendigen Tätigkeiten zu vermeiden. Dies war möglich für die Messungen bei Lüftungsstufen 0, 1, 3 und bei geschlossenem Fenster (8 h ungelüftet). Für Lüftungsstufe 4 war dieses Vorgehen nicht möglich, da das Lüftungsgerät bei Lüftungsstufe 4 nach einer Stunde in einen reduzierten Modus umschaltet, so dass bei Messbeginn am Morgen zunächst die korrekte Lüftungsstufe nachgeregelt werden musste. Um ausreichend Zeit für die Neueinstellung des Gleichgewichts für die PFT zu gewährleisten und dennoch ausreichend Messzeit zur Verfügung zu haben, wurde für Messungen bei Stufe 4 die PFT-Probenahme jeweils direkt im Anschluss an die Abklingmethode durchgeführt. Ähnliches gilt für die Mess-Szenarien mit geöffnetem Fenster (offen, gekippt und Stoßlüftung). Daher wurde auch bei diesen Messungen die PFT-Probenahme im Anschluss an die Abklingmethode ausgeführt.

Parallel zu den CO_2-Daten wurden vom Testo-Gerät (Testo 435) die Innentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck aufgezeichnet. Weitere Daten wie Außentemperatur, Windstärke und Windrichtung sowie relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft wurden aus Daten der Wetterstation Bremen Nord übernommen. Die solare Bestrahlung der Fassade wurde auf dem Messprotokoll dokumentiert.

Die Analytgehalte der so gewonnenen Proben wurden wie in der Validierung beschrieben mittels TD-GC/MS bestimmt (vgl. Kapitel 3.2.2).

Die Luftwechselraten wurden mit einem zusätzlichen Zwischenschritt aus den gemessenen Gehalten der Sammelröhrchen gemäß Formel 1 berechnet. Da sich im Verlauf des Projektes zeigte, dass die Wiederfindungsraten auf den TD-GC/MS-Geräten deutlichen Schwankungen unterworfen sind, wurden die Analytgehalte vor der Weiterberechnung so umgerechnet, dass die Wiederfindung des internen Standards 100 % entsprach. Verwendet wurden nur Daten, bei denen die ursprüngliche Wiederfindung des internen Standards im Bereich von 75–125 % lag.

Während für die Validierung die Emissionsraten der Emissionsquellen für jeden Messtag bestimmt wurden, wurden in den Realraumversuchen stabilere, gemittelte Emissionsraten verwendet wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben und erläutert.

3.3 Konzentrations-Abklingmethode –Materialien, Durchführung, Auswertung und Qualitätssicherung

3.3.1 Geräte und Materialien der Konzentrations-Abklingmethode

Substanzen

Kohlenstoffdioxid	Westfalen AG
Distickstoffmonoxid 4.5	Westfalen AG
Schwefelhexafluorid 5.0	Westfalen AG

Messgeräte

Photoacoustic Multi Gas Monitor INNOVA 1312	LumaSense Technologies
Testo 435 Multifunktions-Messgerät	Testo AG

Testo 605-H1 Thermohygrometer	Testo AG
Cosmos Eco (dezentrales Lüftungssystem)	LUNOS Lüftungstechnik GmbH
Tischventilator VE-5930	Tristar

Der photoakustische Monitor (Innova 1312, Air Tech Instruments) wurde vom Hersteller für die Gase Schwefelhexafluorid, Kohlenstoffdioxid, Distickstoffmonoxid sowie Hexafluorbenzol ausgerüstet und kalibriert (Details zu Messbereich und Kalibrierung siehe Tabelle 2). Das Gerät wurde über einen Messcomputer angesteuert und so programmiert, dass jede Minute ein Messwert für jedes Gas aufgezeichnet wird. Die Funktion „cross interference correction" wurde routinemäßig angeschaltet, um Querempfindlichkeiten zu korrigieren.

Das direktanzeigende Messgerät Testo 435 für CO_2 (Fa. Testo) wurde im üblichen Turnus gemäss QS-System des Bremer Umweltinstituts kalibriert. Die Kalibrierung findet jährlich in akkreditierten Kalibrierlaboratorien statt und gewährleistet eine Genauigkeit von 95 %.

Probenahme und Berechnung der Luftwechselraten im Realraum (Konzentrations-Abklingmethode)

Messung und Auswertung der Konzentrations-Abklingmethode erfolgten gemäß VDI 4300 Blatt 7.

Der Messraum wurde wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben jeweils am Vorabend auf die für die Messung notwendige Lüftungsstufe eingestellt. Für Messungen zu Lüftungsstufe 0 wurden zusätzlich die raumseitigen Teile der Lüftung abgedichtet. Für Lüftungsstufe 1, 3 und 4 wurde die Lüftung entsprechend eingestellt, bei Stufe 4 wurde die Lüftung jeweils vor der Messung und nach 1 Stunde nachgeregelt, um die Reduktion der Lüftungsleistung im „eco"-Modus zu vermeiden. Bei allen anderen Mess-Szenarien wurde die Lüftung auf Stufe 0 eingestellt und die Fenster entsprechend der Szenarien direkt zu Beginn der Messung in die entsprechende Stellung gebracht (offen: ein Fenster 90°, kipp: zwei Fenster in Kippstellung, stoß: ein Fenster für 10 min komplett geöffnet, dann geschlossen).

Der photoakustische Monitor sowie der IR-Sensor Testo 435 wurden für die Messungen vor dem mittleren Regal etwa in Raummitte in einer Höhe von ca. 60 cm positioniert.

Parallel zu den CO_2-Daten wurden vom Testo-Gerät (Testo 435) die Innentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck aufgezeichnet. Weitere Daten wie Außentemperatur, Windstärke und Windrichtung sowie relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft wurden aus Daten der Wetterstation Bremen Nord übernommen. Die solare Bestrahlung der Fassade wurde auf dem Messprotokoll dokumentiert.

Die Tracergase CO_2 und N_2O wurden direkt aus Gasdruckflaschen, SF_6 aus einem Teflonbeutel ausgegeben. Während der Ausgabe war ein Tischventilator (Fa. Tristar) auf niedrigster Stufe eingeschaltet, um die Durchmischung zu beschleunigen. Über die Anzeige des photoakustischen Monitors konnte jeweils die ausgebrachte Gasmenge kontrolliert werden, um die Einhaltung von Grenzwerten und Messbereich zu kontrollieren. Die maximal ausgegebenen Konzentrationen finden sich in Tabelle 2.

Waren die angestrebten Konzentrationen erreicht, wurde der Ventilator ausgeschaltet und der Messraum verlassen. Die Datenaufzeichnung erfolgte durch die Messgeräte automatisch mit einem Messwert pro Minute. Die automatische Korrektur von Querempfindlichkeiten des Innova 1312 war routinemäßig angeschaltet, Ausnahmen sind im Ergebnisteil gekennzeichnet.

Die Auswertung der so aufgezeichneten Luftkonzentrationen erfolgte in halblogarithmischer Darstellung im linearen Bereich, maximal bis zur doppelten Hintergrundkonzentration des jeweiligen Gases. Mit einbezogen wurden Daten frühestens 10 min nach Verlassen des Messraums, da sich in Vorversuchen diese Ventilationszeit als notwendig für das Erreichen einer ausreichenden Durchmischung erwiesen hat. Der Auswertezeitraum wurde von dem Gas bestimmt, das die kürzeste auswertbare Zeitspanne aufwies, da für eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse alle Gase für den gleichen Zeit-

raum ausgewertet wurden. Ausnahmen, die sich aus messtechnischen Gründen ergaben, sind im Ergebnisteil gekennzeichnet. Im so ausgewählten Bereich wurden die Luftwechselraten als Exponenten der exponentiellen Regressionskurven mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms bestimmt. Die zugrundeliegende Berechnung für die Luftkonzentration an beliebigem Zeitpunkt t ist in Formel 2 angegeben.

Formel 2: Bestimmung der LWR aus exponentiellem Abfall - Regressionsmethode

$$\text{Luftkonzentration}_t = \text{Luftkonzentration}_{\text{Start}} \cdot e^{-\text{LWR}\left[\frac{1}{h}\right] \cdot t[\text{h}]}$$

Eine einfache Berechnung aus nur zwei Messwerten (Zweipunktmethode) ist bei idealem Abklingverhalten möglich (siehe Formel 3). Wird der ideale Auswertezeitraum mit rein exponentiellem Abfall ausgewählt, stimmen die Ergebnisse zwischen der Zweipunktmethode und der Regressionsmethode überein.

Formel 3: Bestimmung der LWR aus exponentiellem Abfall - Zweipunktmethode

$$\text{LWR}\left[\frac{1}{\text{h}}\right] = \frac{\ln\left(\frac{\text{Luftkonzentration}_{\text{Start}}}{\text{Luftkonzentration}_{\text{Ende}}}\right)}{t_{\text{Ende}} - t_{\text{Start}}}$$

In der konkreten Anwendung ist es nicht immer auf den ersten Blick ersichtlich, welche Auswertezeit auszuwählen ist. Besonders bei niedrigen LWR und daher stärker schwankenden Werten, ist der lineare Bereich der logarithmischen Darstellung schwieriger zu ermitteln (vgl. Anhang Kapitel 9). Die leichteren Gase CO_2 und N_2O wiesen in unseren Daten dabei stärkere Schwankungen auf als das schwerere SF_6. Zugleich waren bei diesen Gasen jedoch leichte Schwankungen des Luftwechsels deutlicher zu erkennen (vgl. Anhang Kapitel 9).

Dennoch hat die Zeitspanne, die für die Auswertung ausgewählt wird, signifikanten Einfluss auf die bestimmte Luftwechselrate. Theoretische Überlegungen und Vergleichsmessungen zur optimalen Auswertung der Abklingmethode finden sich in DIN EN ISO 12569, Cui 2015 und Okuyama 2012. Nach Okuyama lässt sich die optimale Abklingzeit für kontinuierliche Messungen (Anzahl Messpunkte >60) näherungsweise aus dem Term Luftwechselrate[h^{-1}]*Abklingzeit[h]=1,25 durch iteratives Berechnen ausgehend von einer geschätzten minimalen und maximalen Luftwechselrate bestimmen. Basierend hierauf wird in Cui 2015 der Fehler für Messungen der CO2-Abklingmethode bei Auswertung mittels Regressionsmethode und idealer Messposition sowie Auswertezeit auf 5 % angegeben. Durch abweichende Auswertezeiten wurden dort zusätzliche Fehler um bis zu 10 % gefunden. Wurde die Zweipunktmethode angewandt, lag der Fehler bei 11 % mit bis zu 20 % zusätzlichem Fehler durch suboptimale Abklingzeit. Da die Luftwechselraten in dieser Studie bei 8–40 h^{-1} lagen, waren die optimalen Abklingzeiten im Bereich weniger Minuten.

Wird die Berechnung aus Okuyama 2012 auf unsere Mess-Szenarien angewandt ergeben sich je nach Szenario sehr lange Abklingzeiten. Ausgehend von einer geschätzten LWR von 0,15 h^{-1} für Lüftungsstufe 0 wäre die optimale Abklingzeit 8,3 h. Da die Messzeit auf 120 min angesetzt war, lag die ausgewertete Zeitspanne deutlich darunter und nach Berücksichtigung der oben genannten Kriterien (konstante LWR, linearer Bereich, max. doppelte Hintergrundkonzentration am Ende der Abklingzeit) zwischen 0,6 und 1,6 h. Für Lüftungsstufe 4 läge, berechnet mit dem Sollwert von 0,95 h^{-1}, die optimale Abklingzeit bei 1,3h. Ausgewertet wurde in diesem Szenario bei einer Messzeit von 60 min in einem Bereich von 0,4 bis 0,6 h. Hier zeigt sich, dass die scheinbar sehr einfache Auswertung der Abklingmethode im Detail Herausforderungen bietet und jeweils im Kontext die Faktoren, die für die Auswahl

der ausgewerteten Abklingzeit relevant sind, bestimmt werden müssen. Vor allem bei niedrigen Luftwechselraten sind optimale Abklingzeiten kaum zu realisieren und benötigten zudem hohe Startkonzentrationen, um so lange Abklingzeiten realisieren zu können.

Besonders bei Verwendung von CO_2 als Tracergas müssen noch weitere Faktoren, v. a. das ubiquitäre Vorkommen in messrelevanten Konzentrationen, berücksichtigt werden. Auch in der Literatur finden sich Hinweise darauf, dass die Auswertung von CO_2-Messungen durch unzureichende Informationen über den Verlauf der Außenluftkonzentration erschwert wird (vgl. z. B. Edouard 2016). In VDI 4300 Blatt 7 ist daher vorgesehen, dass bei Einsatz von CO_2 als Tracergas die Außenluftkonzentration von der gemessenen Innenraumkonzentration abgezogen wird, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass kontinuierlich CO_2 über die eintretende Luft mitgeführt wird. Da uns keine zwei gleichartigen Messgeräte für parallele CO_2-Messungen (innen-außen) zur Verfügung standen und damit der Verlauf der Außenluftkonzentration unbekannt war, wurden zwei Varianten der Auswertung überprüft: Zum einen wurde in Anlehnung an die VDI-Vorschrift die zu Beginn bestimmte Hintergrundkonzentration vom Messwert abgezogen und ausgewertet. Zum anderen wurde ein Ansatz gewählt, bei dem die aktiv eingebrachte CO_2 Konzentration deutlich über dem Hintergrundwert liegt und es damit möglich wurde, nur bis zur doppelten Hintergrundkonzentration und im exponentiellen Bereich auszuwerten, um den Einfluss der zuströmenden Luft vernachlässigbar klein zu halten. In Tabelle 7 und Quelle: Eigene Daten

Tabelle 8 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die Auswertung ohne Abzug der Hintergrundkonzentration führt zu einer Unterschätzung der LWR gegen SF_6 resp. den theoretischen Sollwert von bis zu 13 %. Die VDI-Methode überschätzt die LWR hingegen um bis zu 26 %. Beide Varianten sind demzufolge nicht optimal, im Folgenden wurde daher die Variante mit dem kleineren Fehler gewählt.

Tabelle 7: Einfluss der Auswertemethode auf die Luftwechselrate mittels CO_2-Abklingmethode – Messung nach 8 h ungelüftet

Messung	LWR SF_6 [h^{-1}]	LWR CO_2 [h^{-1}]	LWR CO_2 VDI [h^{-1}]	ΔLWR (SF_6-CO_2) [h^{-1}]	ΔLWR (SF_6-CO_2 VDI) [h^{-1}]
F341-3	0,22	0,20	0,29	-0,02	0,07
F341-9	0,22	0,20	0,27	-0,02	0,05
F341-15	0,19	0,17	0,23	-0,02	0,04
Mittelwert	0,21	0,19	0,26	-0,02	0,05

Quelle: Eigene Daten

Tabelle 8: Einfluss der Auswertemethode auf die Luftwechselrate mittels CO_2-Abklingmethode – Messung Lüftungsstufe 1

Messung	Sollwert LWR [h^{-1}]	LWR CO_2 [h^{-1}]	LWR CO_2 VDI [h^{-1}]	ΔLWR (Soll-CO_2) [h^{-1}]	ΔLWR (Soll-CO_2 VDI) [h^{-1}]
F341-18	0,38	0,32	0,49	-0,06	0,11
F341-24	0,38	0,32	0,48	-0,06	0,10
F341-29	0,38	0,34	0,48	-0,04	0,10
MW	0,38	0,33	0,48	-0,05	0,10

Quelle: Eigene Daten

3.3.2 Zusätzliche Evaluationen zur Durchführung der Messungen im Realraum

3.3.2.1 Prinzipielle Eignung von Innova 1312 und Testo 435 für den Methodenvergleich

Erste Messungen der Luftwechselrate mittels Abklingmethode im Realraum stimmen mit den Ergebnissen in Abschnitt 3.4 überein. Wie dort und in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, zeigt sich, dass die Luftwechselraten mittels CO_2-Abkling-Messungen sowohl für Testo 435 als auch für Innova 1312 im Mittel bis zu 20 % vom Sollwert abweichen.

Auffällig sind beim direkten Vergleich der Messgeräte Innova 1312 und Testo 435 die Abweichungen in den gemessenen Konzentrationen für CO_2 (200-300 mg/m³). Die Messunsicherheit für die beiden Geräte [Testo 435: 75 ppm (144 mg/m³), Innova 1312 für CO_2 13 ppm (26 mg/m³)] kann diese Differenz in Teilen erklären, eine Restdifferenz bleibt jedoch für die Konzentrationswerte erhalten. Dies wurde auch in der Literatur beobachtet (vgl. z. B. Edouard 2016) und in einigen Studien wurde daher ein Korrekturfaktor für CO_2-Sensoren bestimmt (siehe z. B. Bekö 2010). Da die Übereinstimmung der Luftwechselraten für beide Geräte in unserem Fall jedoch im Bereich <10 % liegt, wurde hierauf verzichtet.

3.3.2.2 Einfluss der parallelen Messung von SF_6, CO_2 und N_2O mit dem Innova 1312 ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten

Wie bereits bei der Beschreibung der Messgeräte sowie der Tracergaseigenschaften erwähnt, bestehen zwischen einigen der eingesetzten oder auch in der Raumluft enthaltenen Gase (z. B. Wasserdampf) Querempfindlichkeiten beim Einsatz von IR-Detektoren. In Quelle: Eigene Daten

Abbildung 15 ist exemplarisch dargestellt, wie sich die mittels Innova1312 gemessenen Luftkonzentrationen bei Zugabe der anderen Tracergase verändern.

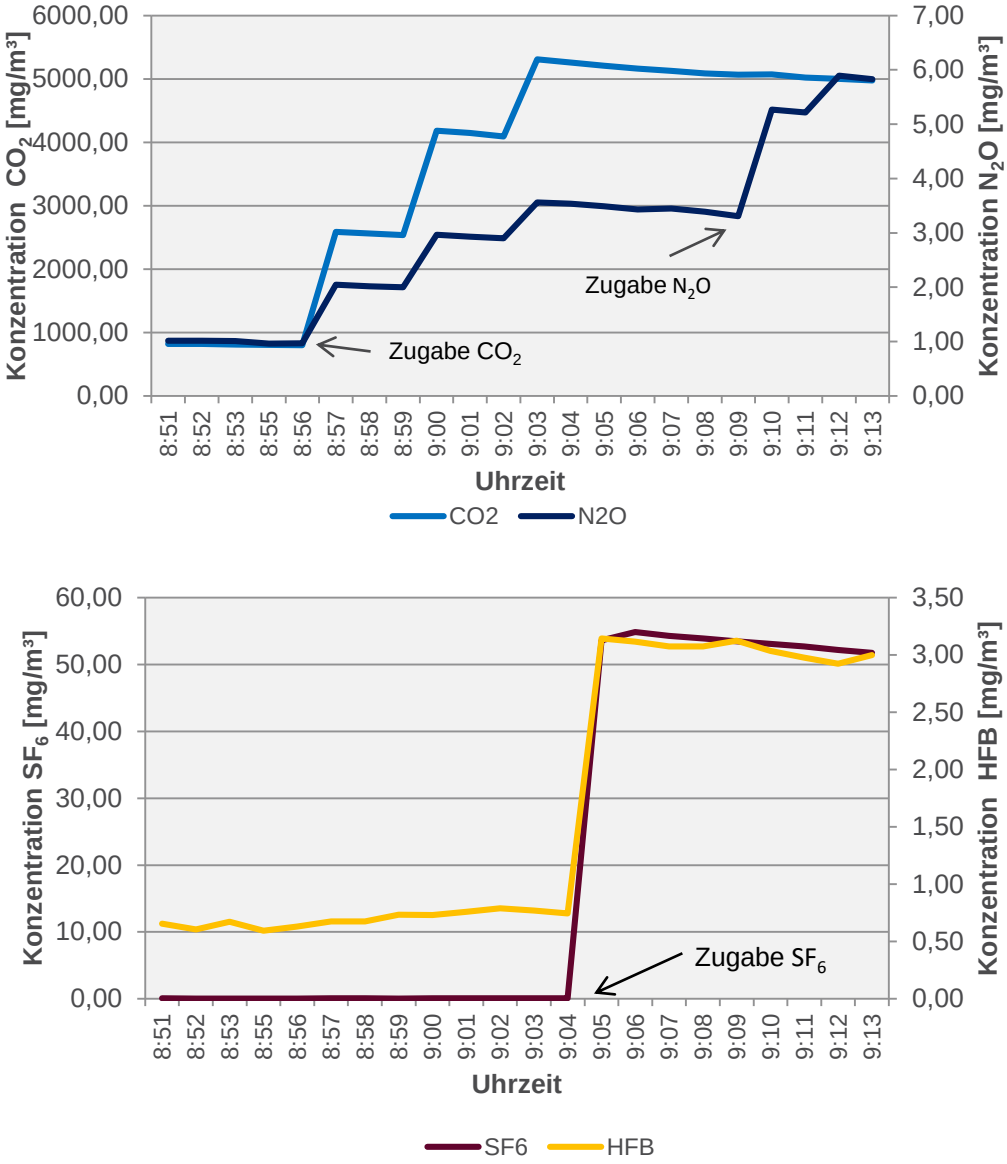
Um diesen Einfluss auf die Messergebnisse zu überprüfen wurden drei Messungen in unterschiedlichen Tracergaskombinationen in der Prüfkammer bei LWR 1 h^{-1} durchgeführt. Gemessen wurde in den Kombinationen SF_6 mit CO_2, SF_6 mit N_2O und SF_6 mit CO_2 und N_2O. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Keine der Luftwechselraten verändert sich um mehr als 5% durch parallele Messung mit einem der anderen Gase, so dass der Einfluss durch die Querempfindlichkeiten bei Betrachtung des Abklingverhaltens im Bereich der Messunsicherheit liegt und vernachlässigt werden kann. Dennoch wurden die Innova 1312-Messungen im Realraum mit Unterstützung der automatischen Korrektur von Querempfindlichkeiten durchgeführt.

Tabelle 9: Einfluss der parallelen Messung verschiedener Tracergase auf berechnete LWR – Abklingmethode ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten in Prüfkammer bei LWR 1 h^{-1}

Verwendete Tracergase	LWR SF_6 [h^{-1}]	LWR N_2O [h^{-1}]	LWR CO_2 [h^{-1}]	LWR CO_2 (Testo) [h^{-1}]
SF_6, N_2O	1,00	0,85	k. A.	k. A.
SF_6, CO_2	0,99	k. A.	0,78	0,75
SF_6, N_2O, CO_2	0,99	0,81	0,76	0,79

Quelle: Eigene Daten

Abbildung 15: Veränderung der gemessenen Konzentrationen mit Innova 1312 bei Zugabe der verschiedenen Tracergase ohne Korrektur der Querempfindlichkeiten



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

3.3.2.3 Durchmischung im Realraum

Um zu überprüfen, ob die Durchmischung der Tracergase mit der Raumluft im Versuchsraum ausreicht, wurden Messungen an drei verschiedenen Mess-Positionen bei Lüftungsstufe 1 durchgeführt. Gemessen wurde mit der Konzentrations-Abklingmethode für alle drei Tracergase gemäß VDI 4300, Blatt 7, mit einer Messdauer von 120 Minuten. Diese Messung wurde dreifach ausgeführt. Aus den Messdaten ergibt sich der Beginn des exponentiellen Abfalls ca. 10 Minuten nach dem Ausbringen der Tracergase unter Verwendung eines Tischventilators zur Durchmischung. Der Ventilator wurde daher nach dem Ausbringen der Gase und Erreichen der Zielkonzentrationen ausgeschaltet und die Auswertung 10 min nach Verlassen des Raumes begonnen. In die Auswertung einbezogen wurden Messwerte ab diesem Zeitpunkt bis zum Messende oder dem Erreichen der doppelten Hintergrundkonzentration. Ausgewertet wurde mit der Methode der exponentiellen Regression.

Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messpositionen für SF_6 (siehe Tabelle 10). Für CO_2 und N_2O ist die Streuung der Werte sowohl zwischen den Positionen als auch den Messtagen höher (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12). Dies entspricht jedoch einer generell höheren Variabilität in Messungen mit diesen Gasen und spiegelt sich auch darin wider, dass die durchschnittliche Luftwechselrate mittels SF_6 um ca. 0,1 h^{-1} über den Werten der beiden anderen Gase liegt.

Alle weiteren Messungen der Studie wurden in der Raummitte durchgeführt. Dies auch um Messungen in den Bereichen möglicher Luftkurzschlüsse zwischen Fenstern oder Lüftung auszuschließen (vgl. Cui 2015).

Tabelle 10: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas SF_6 bei Lüftungsstufe 1

Messtag	LWR [h^{-1}] Raummitte	LWR [h^{-1}] Vor Fensterfront	LWR [h^{-1}] Neben Tür	RSD über die Messpositionen[%]
31.05.2017[a)]	0,39	0,37	0,35	5
12.06.2017[a)]	0,39	0,39	0,34	8
28.06.2017	0,40	0,36	0,38	5
Mittelwert	0,39	0,37	0,36	6

Quelle: Eigene Daten

a) Messung ohne Korrektur der Querempfindlichkeit

Tabelle 11: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas N_2O bei Lüftungsstufe 1

Messtag	LWR [h^{-1}] Raummitte	LWR [h^{-1}] Vor Fensterfront	LWR [h^{-1}] Neben Tür	RSD über die Messpositionen[%]
31.05.2017[a)]	0,35	0,31	0,28	11
12.06.2017[a)]	0,32	0,32	0,31	2
28.06.2017	0,24	0,32	0,33	17
Mittelwert	0,30	0,32	0,31	10

Quelle: Eigene Daten

a) Messung ohne Korrektur der Querempfindlichkeit

Tabelle 12: Testmessungen zur Durchmischung im Realraum mit Tracergas CO_2 bei Lüftungsstufe 1

Messtag	LWR [h^{-1}] Raummitte	LWR [h^{-1}] Vor Fensterfront	LWR [h^{-1}] Neben Tür	RSD über die Messpositionen[%]
31.05.2017[a)]	0,34	0,32	0,29	8
12.06.2017[a)]	0,32	0,31	0,30	3
28.06.2017	0,37	0,31	0,32	10
Mittelwert	0,34	0,31	0,30	7

Quelle: Eigene Daten

a) Messung ohne Korrektur der Querempfindlichkeit

3.4 Validierung der Tracergas-Messungen in Prüfkammern mit definiertem Luftwechsel (Passive Emissionsmethode und Konzentrations-Abklingmethode)

Um Präzision und Richtigkeit der verschiedenen Methoden und Tracergase zu untersuchen, wurden die zu untersuchenden Gase in eine 1 m^3-Glaskammer bei zwei voreingestellten Luftwechselraten (0,5 h^{-1} und 1,0 h^{-1}) und konstanter Durchmischung eingebracht und Proben entnommen. Die Auswertung erfolgte wie in den Abschnitten 3.2.4 und 3.3.1 für Messungen im Realraum beschrieben. Abweichend Auswertungen sind direkt bei den Ergebnissen vermerkt.

Die Emissionsröhrchen der PFT (Aufbau SV) wurden mindestens 8 Stunden vor Messbeginn in die Kammer eingebracht. Die Probenahme erfolgte aktiv mittels BIVOC2-Pumpen über Schläuche aus der Kammerluft. Die Probenahme der PFT betrug 10 min bei einer Durchflussrate von 0,2 L/min und erfolgte vor Ausbringung der Tracergase für die Abklingmethode.

Die Gase für die Abklingmethode wurden direkt über die entsprechenden Gasflaschen durch eine Öffnung in die Kammer eingebracht. Die Probenahme mittels photoakustischem Monitor erfolgte ebenfalls über Schläuche aus der Kammerluft. Es wurden minütlich über zwei Stunden Proben aus der Kammerluft gezogen. Die Sonde des Messgeräts Testo 435 verblieb während der Messungen in der Kammer.

Klimadaten wurden mittels zweier Geräte aufgezeichnet. Kammertemperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer wurden mittels Thermohygrometer Testo 605-H1 jeweils vor der Messung erfasst und auf dem Messprotokoll dokumentiert. Der Luftdruck wurde zeitgleich aus den Daten des Testo 435 übernommen.

Wie für die Realraummessungen wurden jeweils fünf Messungen pro voreingestellter LWR durchgeführt. Die Ergebnisse sind in

Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt und werden im Folgenden kurz diskutiert.

Für beide Messreihen lagen die Ergebnisse für SF_6 mit prozentualen Abweichungen von unter 1 % sehr nahe an den voreingestellten Werten. Daher können die Ergebnisse der SF_6-Messungen für die Realraumuntersuchungen, in denen der wahre Luftwechsel unbekannt ist, als Referenzwerte verwendet werden.

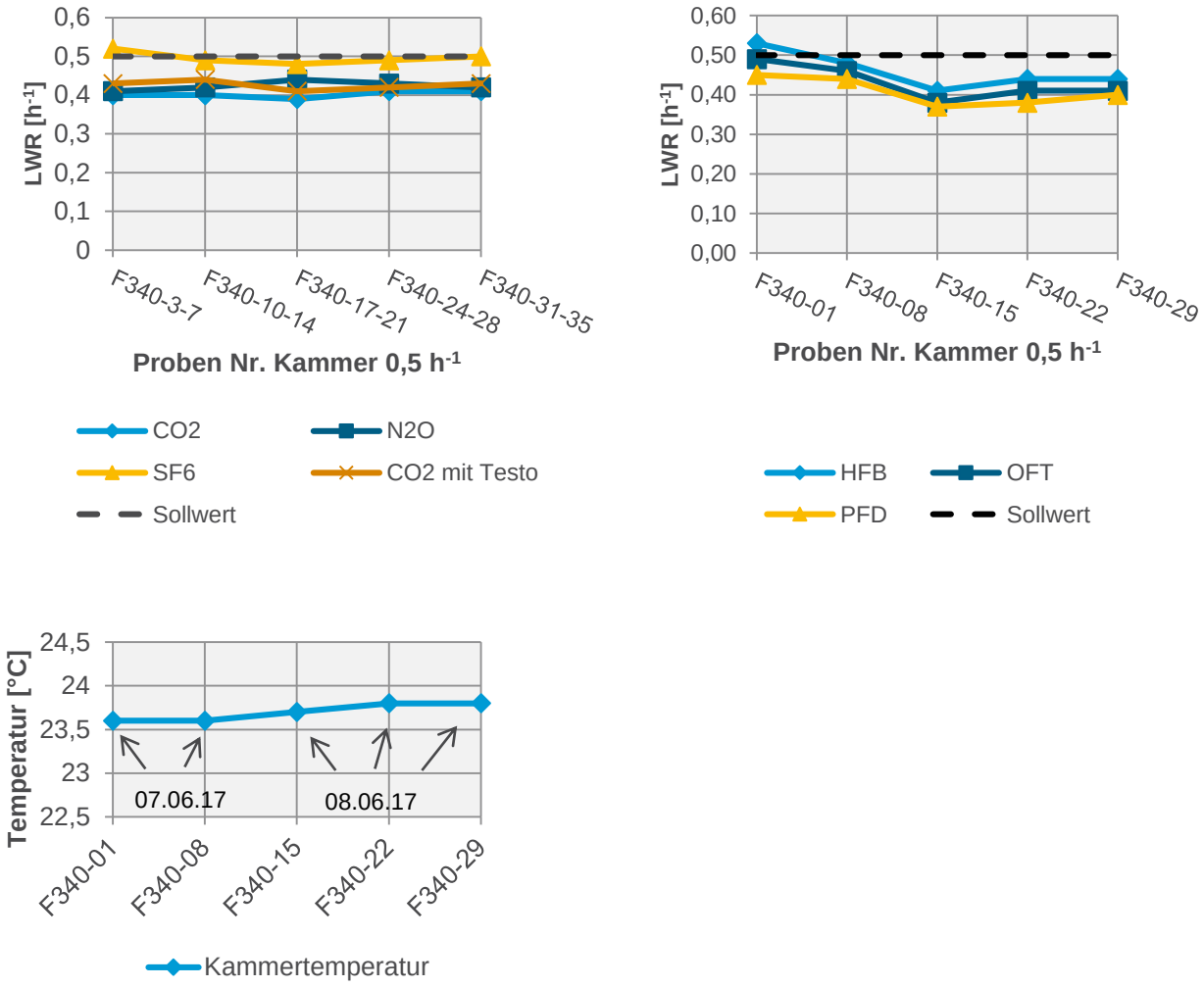
Sowohl für N_2O als auch für CO_2 wird die LWR durchschnittlich bis zu 15 resp. 20 % unterschätzt, obwohl die Präzision mit relativen Standardabweichungen unter 4 % ausreichend gut ist. Wie in Kapitel 6.1 dargestellt, zeigt sich auch für die Kammermessungen bei voreingestellter LWR von 1 h^{-1} bereits folgende Reihenfolge der mittleren LWR: SF_6>N_2O>CO_2>CO_2 Testo.

Die Ergebnisse für die PFT-Methode liegen bzgl. Präzision und Genauigkeit in dem Bereich, der in der Methodenvalidierung festgestellt wurde. Die Präzision für die einzelnen Gase liegt im Bereich von ±10 %, die mittleren Luftwechselraten weichen nach oben und unten um bis zu 18 % vom voreingestellten Luftwechsel ab.

Tendenziell sinken die mittels PFT-Methode gemessenen Luftwechselraten im Verlauf beider Messreihen ab. Während sich dieses Verhalten für die Messungen bei 0,5 h^{-1} aus dem Temperaturverlauf und damit möglicherweise schwankenden Emissionsraten erklären ließe (Temperatur und reale Emissionsrate steigen und damit auch die Konzentration in der Kammer während für die Berechnung nur gemittelte Werte verwendet werden können), lässt sich eine ähnliche Schlussfolgerung für die Messungen bei 1,0 h^{-1} nicht nachvollziehen. Hier wird die höchste Luftwechselrate zu Beginn bei der höchsten Temperatur und die niedrigste Luftwechselrate am Ende bei niedrigster Temperatur bestimmt. Daher müssen andere Faktoren wie Messunsicherheiten der Methode einen ähnlich starken Einfluss auf die Genauigkeit haben.

Insgesamt zeigen bereits die Messungen in der Prüfkammer, dass Messmethode und Tracergas deutlichen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben.

Abbildung 16: Gemessene LWR bei voreingestellter LWR 0,5 h^{-1} in der Prüfkammer. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Kammertemperatur



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

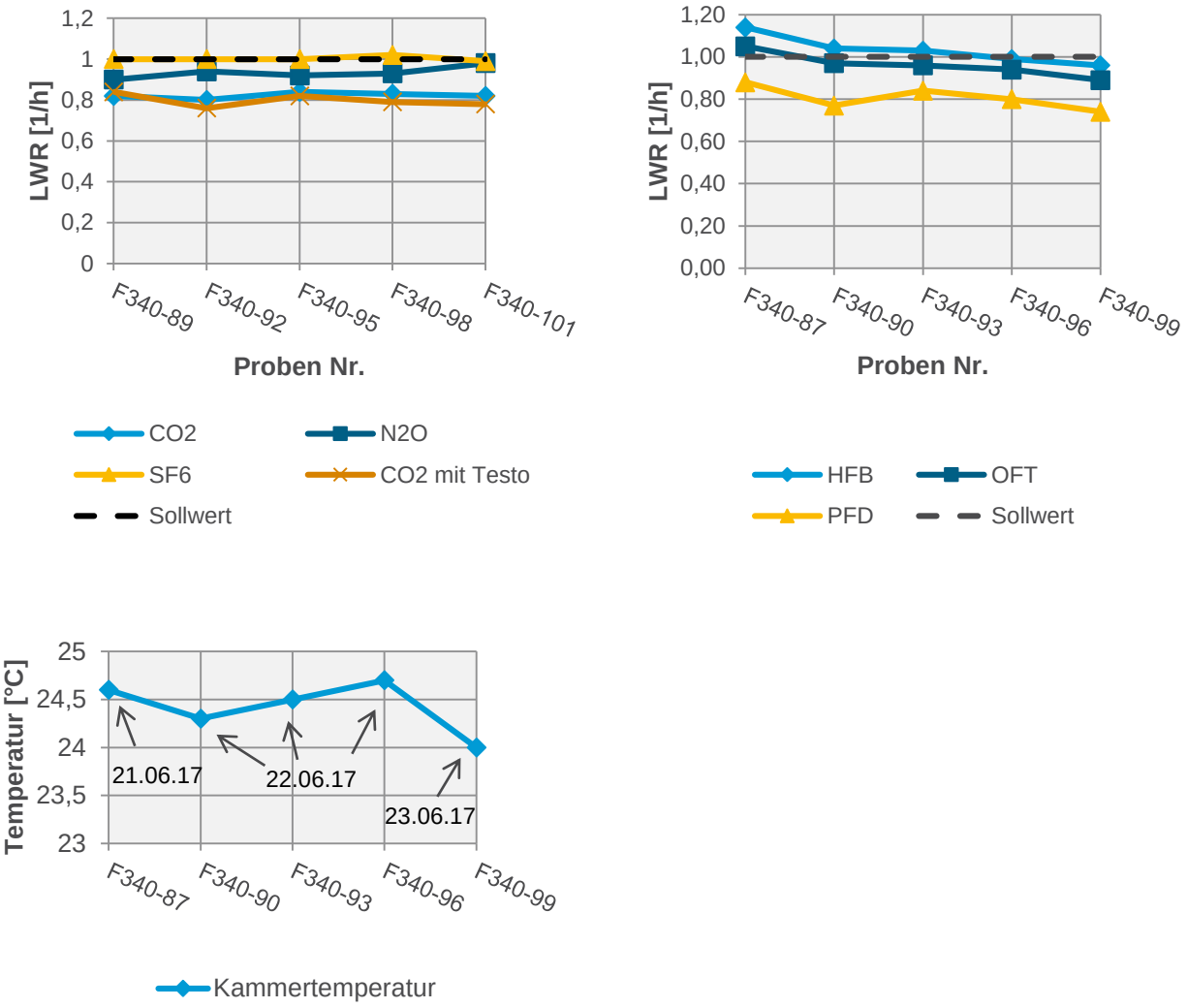
Tabelle 13: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen in der Prüfkammer (voreingestellte LWR 0,5 h^{-1})[a)]

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	0,50	0,42	0,40	0,43	0,46	0,43	0,41
RSD [%]	3	3	2	3	10	10	9
Abw. Sollwert [%]	-1	-15	-20	-15	-8	-14	-18

Quelle: Eigene Daten

a) Messungen wurden ohne Korrektur von Querempfindlichkeiten durchgeführt. Das Messgerät Testo 435 hat in dieser Messreihe nur alle 5 Minuten Werte aufgezeichnet. Die gemessenen Probengehalte der Perfluorcarbontracer konnten nicht auf 100% Wiederfindung des internen Standards umgerechnet werden, da sich der verwendete Standard aufkonzentriert hatte.

Abbildung 17: Gemessene LWR bei voreingestellter LWR 1,0 h^{-1} in der Prüfkammer. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Kammertemperatur



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 14: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen in der Prüfkammer (eingestellte LWR 1,0 h^{-1})[a)]

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	1,00	0,93	0,82	0,80	1,03	0,96	0,81
RSD [%]	1	3	2	4	7	6	7
Abw. Soll-wert [%]	0	-7	-18	-20	3	-4	-19

Quelle: Eigene Daten

a) Bei Messungen F340-98 und F340-101 sind für das Gerät Testo 435 Daten erst 30 resp. 20 Minuten nach Start des Photoakustischen Monitors vorhanden. Eine exakt zeitgleiche Auswertung der Abklingkurven von CO_2 (Testo) mit den anderen Gasen war daher nicht möglich.

4 Bestimmung der Luftwechselraten in einem Realraum - gleichzeitiger Einsatz mehrerer Tracergase bei verschiedenen Lüftungsstufen und Lüftungsszenarien

4.1 Methodik der Messungen im Realraum

Der Raum, in dem die Messungen durchgeführt wurden, sowie das dort eingebaute Lüftungsgerät sind in Abschnitt 3.1 beschrieben. Die eingesetzten Messgeräte sowie Details zu Durchführung und Auswertung der Messungen im Realraum finden sich in den Abschnitten 3.2.1, 3.2.2, 3.2.4 sowie 3.3.1.

4.2 Ergebnisse der Luftwechselratenbestimmung im Realraum

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Messungen im Realraum berichtet. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6. Als angestrebte Werte für Präzision und Richtigkeit werden die Akzeptanzkriterien aus der Validierung angesetzt. Diese liegen bei einem Variationskoeffizienten von 10 % und einer maximalen Abweichung von 25 % und wurden in den Kammermessungen in Abschnitt 3.4 bestätigt.

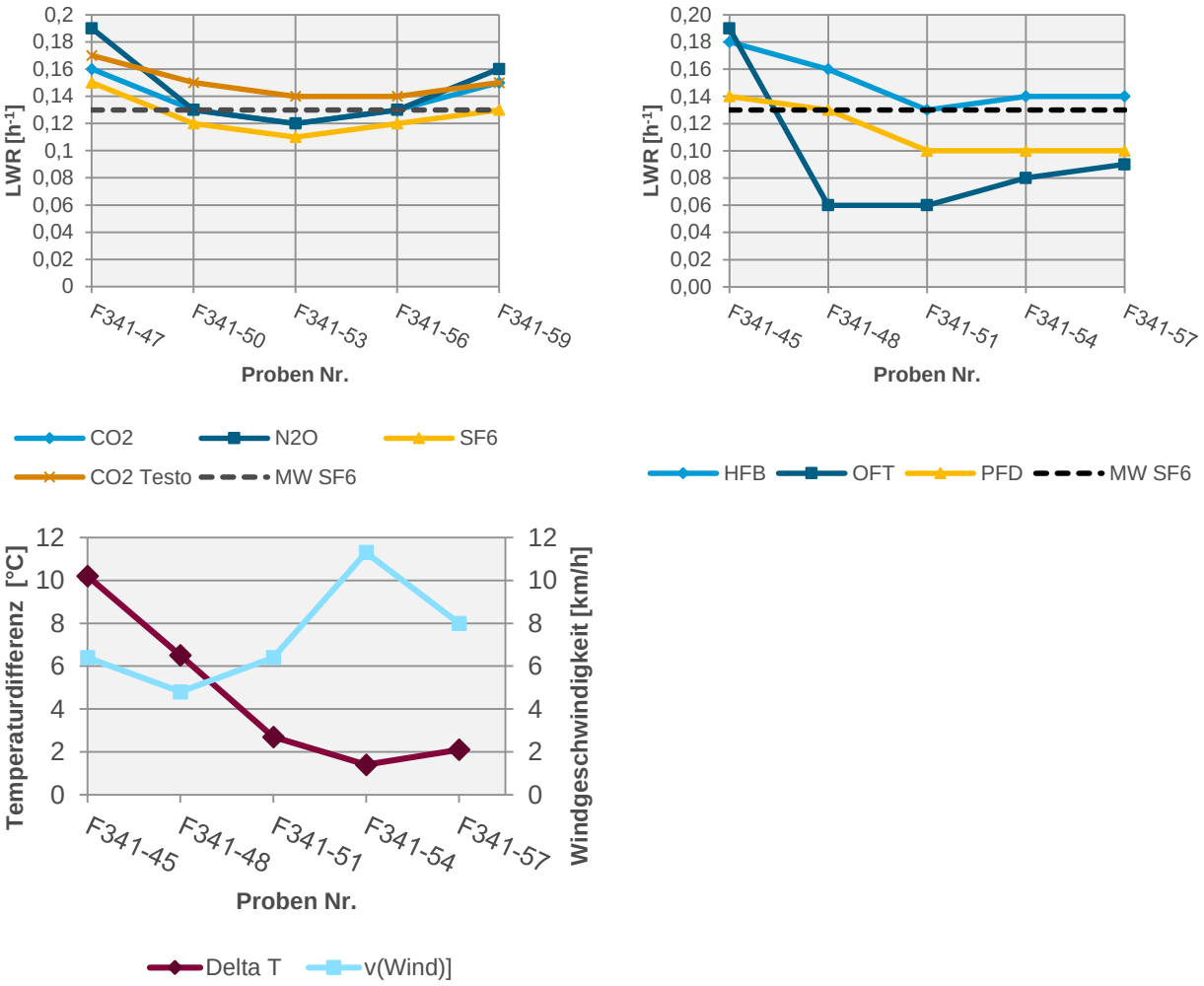
4.2.1 Lüftungsstufe 0 mit abgedichtetem Lufteinlass und –auslass

Sowohl für die Abklingmethode als auch für die PFT-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit bis zu 20 % (N_2O) resp. 56 % (OFT) über dem angestrebten Wert. Die Abweichung vom SF_6-Referenzwert liegt mit bis zu maximal 24 % nach oben (CO_2 Testo) und unten (OFT) gerade noch im akzeptablen Bereich (siehe Tabelle 15).

Trotz der relativ betrachtet hohen mittleren Abweichung von den SF_6-Werten, geben alle Tracergase die Größenordnung der Luftwechselrate gleich wieder. Für die Abklingmethode liegen alle gemessenen Werte zwischen 0,11 und 0,19 h^{-1}. Für HFB und PFD liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich (0,10–0,18 h^{-1}). Lediglich für OFT liegen vier Messungen deutlich niedriger (0,06-0,09 h^{-1}) (siehe Abbildung 18).

Für diese Messungen lässt sich eine schwache Korrelation zwischen der Temperaturdifferenz innen-außen mit den gemessenen Luftwechselraten feststellen, aufgrund der geringen Datenlage kann diese jedoch statistisch nicht abgesichert werden (vgl. Anhang Kapitel 9).

Abbildung 18: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 0 (abgedichtete Lüftung). Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 15: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 0 (Lüftung abgedichtet)[a)]

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,10	0,11
RSD [%]	12	20	12	8	13	56	17
Abw. zu SF_6 [%]	n. a.	16	10	19	19	-24	-10

Quelle: Eigene Daten

a) Vor dieser Messreihe lag die Hintergrundkonzentration für N_2O ungewöhnlich hoch. Die Auswertung erfolgte für N_2O daher bis zur einfachen Hintergrundkonzentration, da das Gas zwischen den Messungen wieder deutlich weiter abfiel.

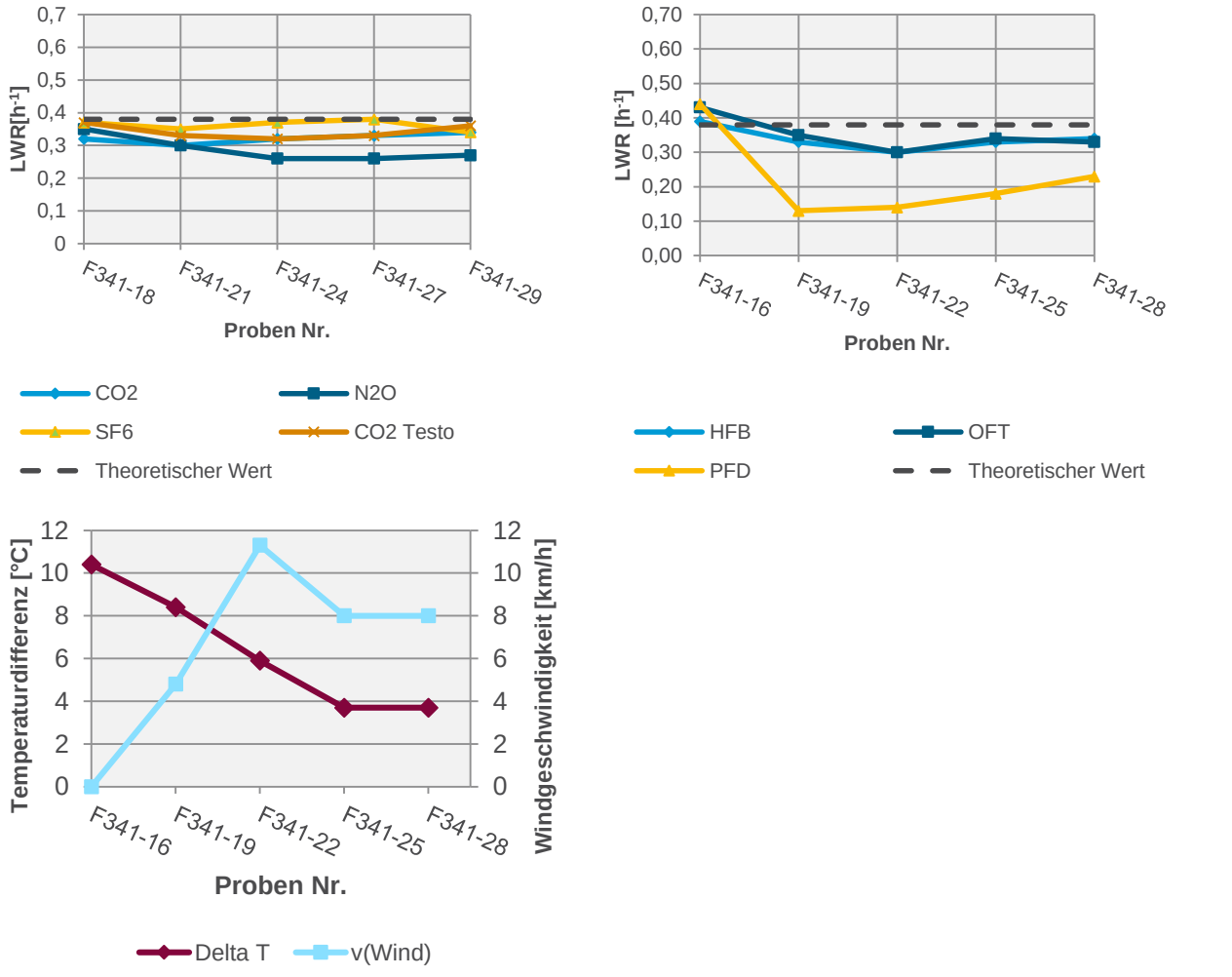
4.2.2 Lüftungsstufe 1

Sowohl für die Abklingmethode als auch für die PFT-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit bis zu 13 % (N_2O) resp. 57 % (PFD) über dem angestrebten Wert. Die Abweichung vom Sollwert liegt mit bis zu maximal 24 % Unterschätzung der LWR (CO_2) für die Abklingmethode gerade noch im akzeptablen Bereich. Für die PFT-Methode liegt v. a. der Wert von PFD mit 41 % mittlerer Abweichung deutlich außerhalb des angestrebten Bereichs. Für HFB und OFT sind die Werte im Akzeptanzbereich (siehe Tabelle 16).

Trotz der relativ betrachtet hohen mittleren Abweichung vom Sollwert geben alle Tracergase bis auf PFD die Größenordnung der Luftwechselrate gleich wieder(siehe Abbildung 19). Für die Abklingmethode liegen alle gemessenen Werte zwischen 0,26 und 0,38 h^{-1}. Für HFB und OFT liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich (0,30–0,43 h^{-1}). Lediglich für PFD liegen vier Messungen deutlich niedriger (0,13-0,23 h^{-1}).

Für diese Messungen lässt sich für die Tracergase HFB und OFT eine schwache Korrelation zwischen der Temperaturdifferenz innen-außen mit den gemessenen Luftwechselraten feststellen, aufgrund der geringen Datenlage kann diese jedoch statistisch nicht abgesichert werden (vgl. Anhang Kapitel 9).

Abbildung 19: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 1. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 16: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 1

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW [h^{-1}]	0,36	0,29	0,32	0,34	0,34	0,35	0,22
RSD [%]	5	13	5	6	10	14	57
Abw. zu Sollwert [%][a)]	-5	-24	-15	-10	-11	-8	-41

Quelle: Eigene Daten

a) Theoretischer Wert gemäß Herstellerangaben der Lüftung: 0,38 h^{-1}.

4.2.3 Lüftungsstufe 3

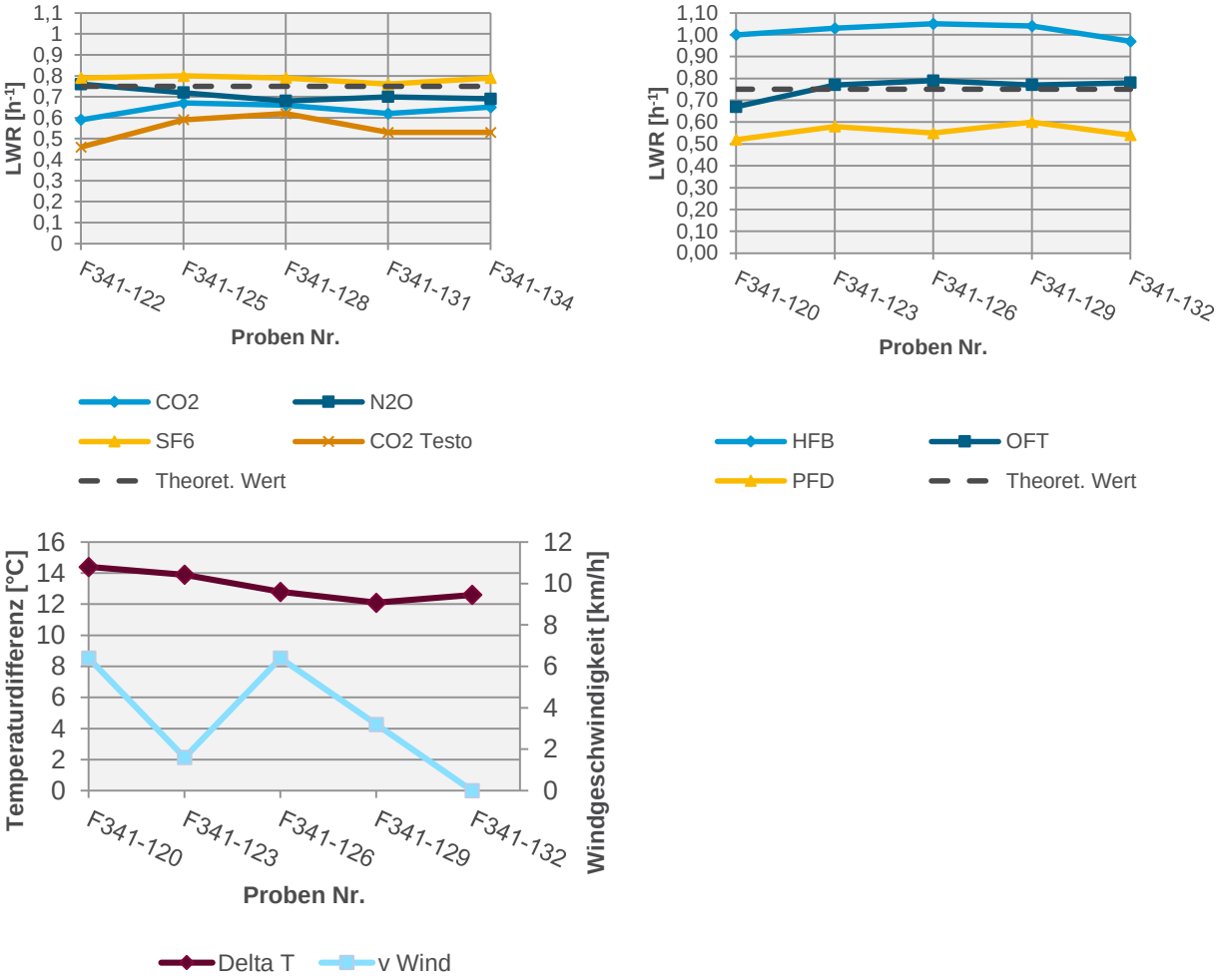
Sowohl für die Abklingmethode (ohne CO_2 Testo) als auch für die PFT-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit bis zu 5 % (CO_2) resp. 6 % (OFT/PFD) im angestrebten Bereich. Für CO_2 Testo liegt der RSD-Wert mit 11 % knapp oberhalb des Akzeptanzwerts von 10 %. Für die Abklingmethode ohne CO_2 Testo liegen hier auch die mittleren Abweichungen vom Sollwert in einem Bereich von <15 %. Für CO_2 Testo und die PFT-Methode weichen die Ergebnisse stärker vom Sollwert ab. Für CO_2 Testo wird die mittlere LWR mit 27 % unterschätzt, im Rahmen der PFT-Messungen treten sowohl Überschätzung (HFB 36%) als auch Unterschätzung (PFD -26 %) auf (siehe Tabelle 17).

Für die Messungen bei Lüftungsstufe 3 geben die Tracergase SF_6, CO_2, N_2O und OFT die Werte ähnlich wieder (min. 0,59 h^{-1}, max. 0,79 h^{-1}). Für die Messungen CO_2 Testo, HFB und PFD variieren die Werte zwischen 0,46 h^{-1} und 1,05 h^{-1} (siehe Abbildung 20).

Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft (Δ_T) in dieser Messreihe stabil zwischen 12 und 14 °C lag, lässt sich kein Zusammenhang zur Entwicklung der LWR innerhalb der Reihe feststellen. Zu einem möglichen Zusammenhang zwischen kleiner Schwankung von Δ_T und der Variationskoeffizienten innerhalb der Messreihe siehe Kapitel 6.1.

Für dieses Mess-Szenario wird bereits ein Trend beobachtet, der in Kapitel 6.1 ausführlicher beleuchtet wird: Alle Messungen, die bei höheren LWR durchgeführt wurden, zeigen für SF_6 die höchste mittlere LWR gefolgt von N_2O, CO_2 und CO_2 Testo in absteigender Reihenfolge.

Abbildung 20: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 3. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 17: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 3

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	0,79	0,71	0,64	0,55	1,02	0,76	0,56
RSD [%]	2	4	5	11	3	6	6
Abw. zu Sollwert [%][a)]	5	-5	-15	-27	36	1	-26

Quelle: Eigene Daten

a) Theoretischer Wert gemäß Herstellerangaben der Lüftung: 0,75 h^{-1}.

4.2.4 Lüftungsstufe 4

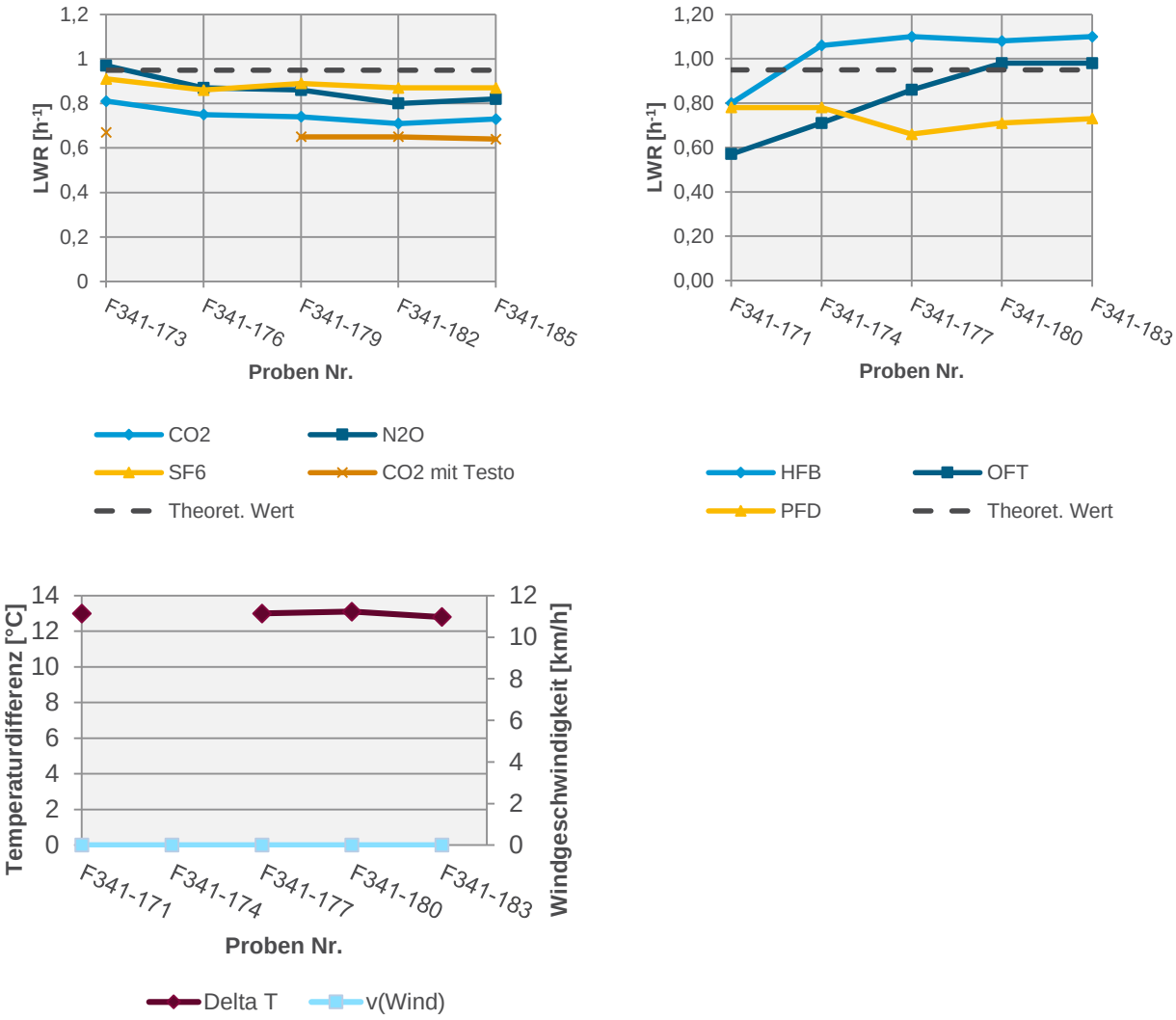
Für die Abklingmethode liegt die Variabilität der Messungen mit bis zu 8 % (N_2O) im angestrebten Bereich. Die Ergebnisse der PFT-Methode variieren stärker mit RSD-Werten von bis zu 22 %. Die Abweichung vom Sollwert liegt für alle Messungen (ohne CO_2 Testo) mit einer maximalen mittleren Abweichung von 23 % innerhalb des Akzeptanzbereichs mit einer deutlichen Tendenz zur Unterschätzung der LWR. Für CO_2 Testo werden die Akzeptanzgrenzen mit einer negativen Abweichung des Mittelwerts von -31 % überschritten (siehe Tabelle 18).

Für die Messungen bei Lüftungsstufe 4 geben die Tracergase SF_6, CO_2 und N_2O die Werte stabil ähnlich wieder (min. 0,80 h^{-1}, max. 0,97 h^{-1}). Die CO_2-Messungen unterschätzen die LWR mit Werten zwischen 0,64 h^{-1} und 0,81 h^{-1}. Die Ergebnisse der PFT-Methode schwanken stark zwischen 0,57 h^{-1} und 1,10 h^{-1} (siehe Abbildung 21).

Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft (Δ_T) in dieser Messreihe stabil bei 13 °C lag, lässt sich kein Zusammenhang zur Entwicklung der LWR innerhalb der Reihe feststellen. Zu einem möglichen Zusammenhang zwischen kleiner Schwankung von Δ_T und der Variationskoeffizienten innerhalb der Messreihe siehe Kapitel 6.1.

Für dieses Mess-Szenario wird ein Trend beobachtet, der in Kapitel 6.1 ausführlicher beleuchtet wird: Alle Messungen, die bei höheren LWR durchgeführt wurden, zeigen für SF_6 die höchste mittlere LWR gefolgt von N_2O, CO_2 und CO_2 Testo in absteigender Reihenfolge.

Abbildung 21: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Lüftungsstufe 4. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 18: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Lüftungsstufe 4

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	0,88	0,86	0,75	0,65	1,03	0,82	0,73
RSD [%]	2	8	5	2	13	22	7
Abw. zu Sollwert [%][a)]	-7	-9	-21	-31	8	-14	-23

Quelle: Eigene Daten

a) Theoretischer Wert gemäß Herstellerangaben der Lüftung: 0,95 h^{-1}.

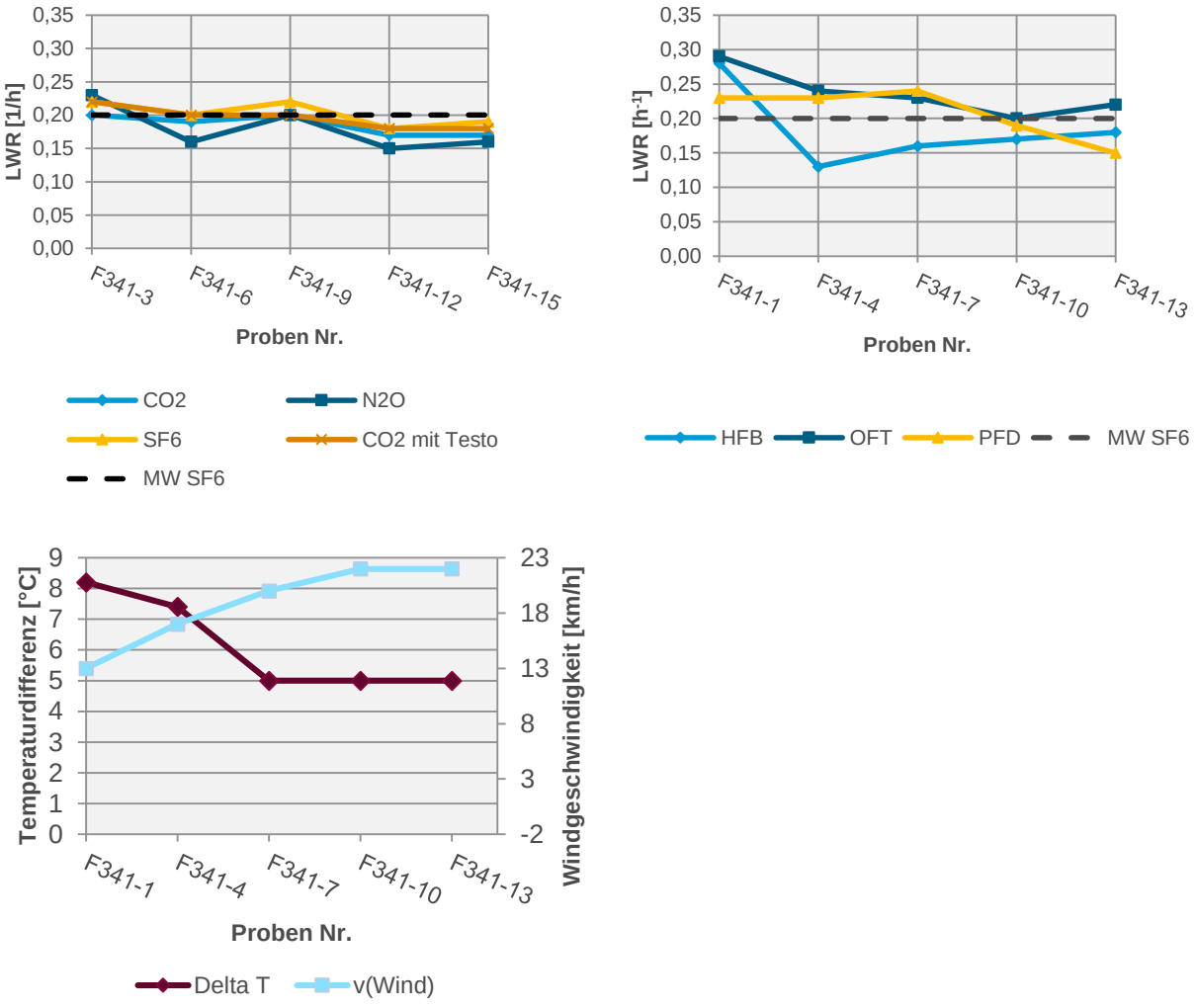
4.2.5 Lüftungsszenario: Messung nach 8 Stunden geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und -auslass offen)

Sowohl für die Abklingmethode als auch für die PFT-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit RSD-Werten bis zu 19 % (N_2O) resp. 31 % (HFB)über dem angestrebten Wert. Die Abweichung vom SF_6-Referenzwert liegt mit bis zu maximal 17 % nach oben (OFT) und -11% nach unten (N_2O) im akzeptablen Bereich (siehe Tabelle 19).

Trotz der relativ betrachtet hohen mittleren Abweichung von den SF_6-Werten geben alle Tracergase die Größenordnung der Luftwechselrate gleich wieder und schwanken um den SF_6-Mittelwert von 0,20 h^{-1}. Für die Abklingmethode liegen alle gemessenen Werte zwischen 0,15 und 0,23 h^{-1}. Für die PFT-Methode schwanken die Werte insgesamt stärker und liegen zwischen 0,13 und 0,29 h^{-1} (siehe Abbildung 22).

Für diese Messungen lässt sich eine schwache Korrelation zwischen der Temperaturdifferenz innen-außen mit den gemessenen Luftwechselraten feststellen, aufgrund der geringen Datenlage kann diese jedoch statistisch nicht abgesichert werden (vgl. Anhang Kapitel 9).

Abbildung 22: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum nach 8 h geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und –auslass offen). Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 19: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen nach 8 h geschlossenem Fenster (Lüftungsstufe 0, Lufteinlass und –auslass offen)[a)]

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	0,20	0,18	0,19	0,20	0,18	0,24	0,21
RSD [%]	9	19	8	9	31	14	18
Abw. zu SF_6 [%]	n. a.	-11	-8	-3	-9	17	3

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

a) In dieser Messreihe sind die Messdaten des Geräts Testo 435 erst ab 15 Minuten nach Start des Photoakustischen Monitors verfügbar. Eine exakt zeitgleiche Auswertung der Abklingkurven von CO2 (Testo) mit den anderen Gasen ist daher nicht möglich.

4.2.6 Lüftungsszenario: 10 Minuten Stoßlüftung

Für dieses Lüftungsszenario ist der direkte Vergleich der gemessenen LWR von Abkling- und PFT-Methode nicht möglich, da die Abklingmethode separat in den beiden Phasen geöffnetes Fenster und geschlossenes Fenster nach Lüftung ausgewertet werden muss (siehe dazu exemplarische Darstellung einer Abklingkurve bei Stoßlüftung im Anhang Kapitel 9). Die PFT-Methode, für die die Probenahme am Ende der Abklingmessung durchgeführt wurde, gibt dagegen die mittlere LWR über den gesamten Versuchszeitraum wieder. Um dennoch einen Vergleich durchführen zu können, wurde folgendes Vorgehen gewählt: Die LWR, die während geöffnetem Fenster gemessen wurde, wurde mit der Luftwechselrate, die im Anschluss daran bei geschlossenem Fenster gemessen wurde, im Verhältnis 10:110 berechnet. Dieses Verhältnis wurde gewählt, da die Stoßlüftung über 10 min erfolgte und daran anschließend für weitere 110 min gemessen wurde bis die PFT-Probenahme stattfand. Der folgende Vergleich beruht auf den so berechneten mittleren LWR. In Abbildung 23 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

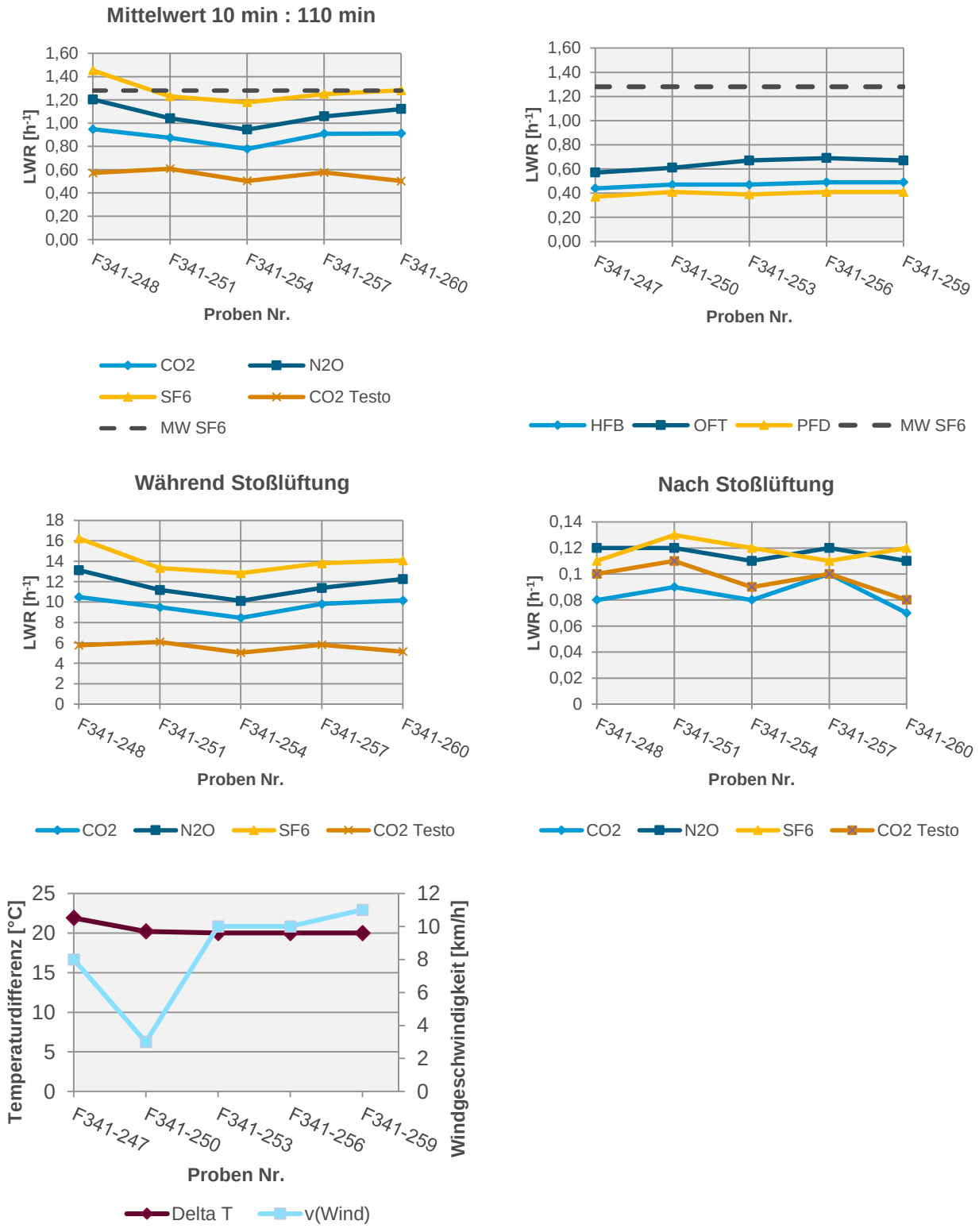
Für beide Methoden liegt die Variabilität der Messungen mit RSD-Werten von bis zu 9 % (N_2O, CO_2 Testo) im angestrebten Bereich. Die Ergebnisse aller Tracergase liegen unter dem SF_6-Referenzwert von 1,28 h^{-1} mit deutlichen Abweichungen zwischen -16 % (N_2O mit 1,07 h^{-1}) und bis zu -69 % (PFD, 0,40 h^{-1}) (siehe Tabelle 20 und Quelle: Eigene Daten

Tabelle 21).

Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft (Δ_T) in dieser Messreihe nur wenig zwischen 20 und 22 °C variierte, lässt sich kein belastbarer Zusammenhang zur Entwicklung der LWR innerhalb der Reihe feststellen. Zu einem möglichen Zusammenhang zwischen kleiner Schwankung von Δ_T und der Variationskoeffizienten innerhalb der Messreihe (siehe Kapitel 6.1 und Abbildung 23).

Für dieses Mess-Szenario wird ein Trend beobachtet, der in Kapitel 6.1 ausführlicher beleuchtet wird: Alle Messungen, die bei höheren LWR durchgeführt wurden, zeigen für SF_6 die höchste mittlere LWR gefolgt von N_2O, CO_2 und CO_2 Testo in absteigender Reihenfolge.

Abbildung 23: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Stoßlüftung 10 min. Links oben: gewichtete Mittelwerte Abklingmethode ganzer Messzeitraum; rechts oben: PFT-Methode; links Mitte: Abklingmethode während der Stoßlüftung; rechts Mitte: Abklingmethode nach der Stoßlüftung; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 20: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen gemittelt über 10 min Stoßlüftung und 110 min nach Stoßlüftung bei geschlossenem Fenster

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW[h^{-1}]	1,28	1,07	0,88	0,55	0,47	0,64	0,40
RSD [%]	8	9	7	9	4	8	5
Abw. zu SF_6 [%]	n. a.	-16	-31	-57	-63	-50	-69

Quelle: Eigene Daten

Tabelle 21: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörigen Standardabweichung der fünf Messungen während und nach einer Stoßlüftung von 10 min (nur Abklingmethode)

LWR	Während Stoßlüftung				Nach Stoßlüftung			
	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)
MW[h^{-1}]	14,05	11,61	9,69	5,58	0,12	0,12	0,08	0,10
RSD [%]	9	10	8	8	7	5	14	12
Abw. zu SF_6 [%]	n. a.	-17	-31	-60	n. a.	-2	-29	-19

Quelle: Eigene Daten

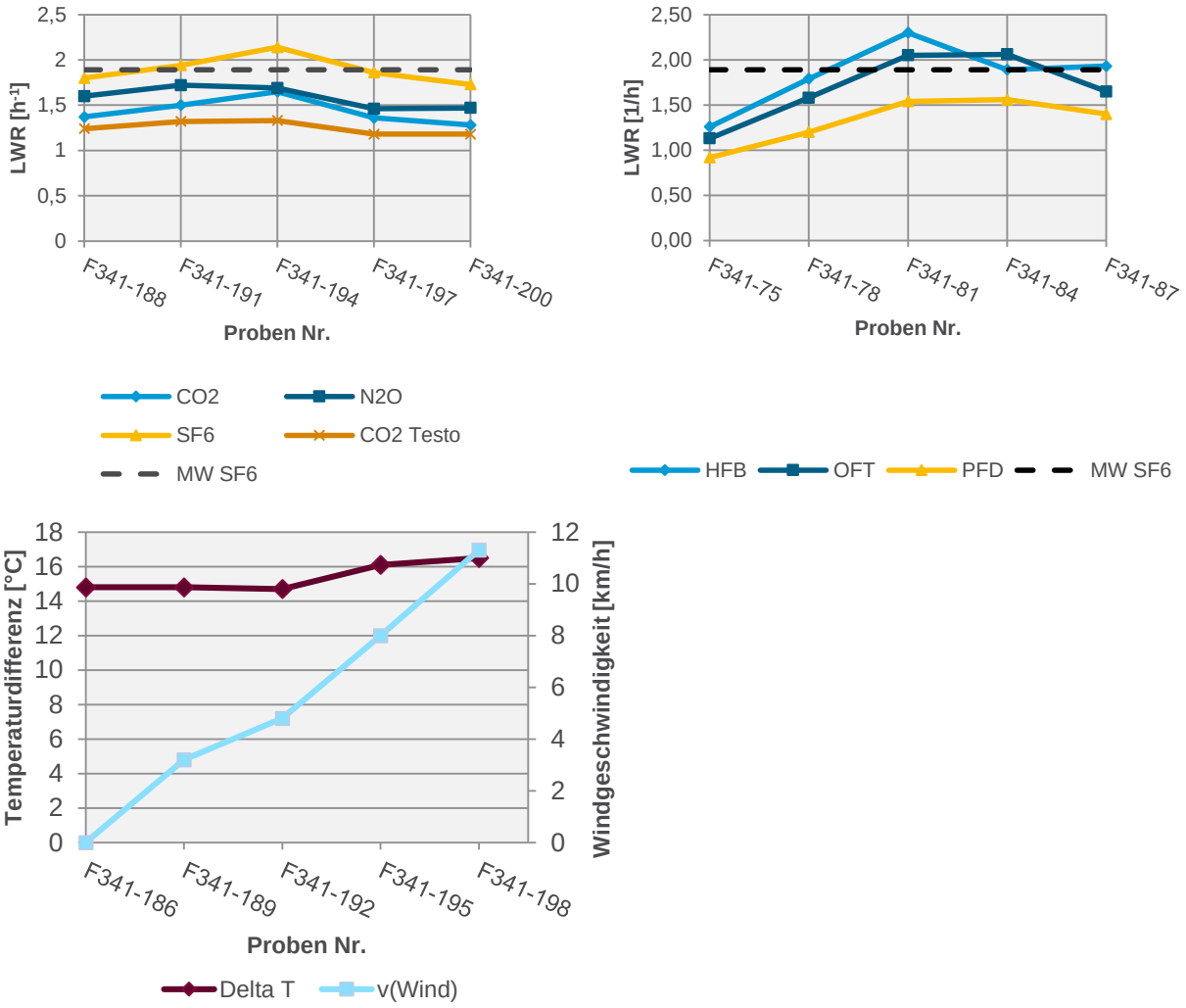
4.2.7 Lüftungsszenario: Kipplüftung

Für die Abkling-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit RSD-Werten von bis zu 8 % (SF_6, N_2O) im angestrebten Bereich. Die Ergebnisse der PFT-Methode schwanken stärker mit RSD-Werten zwischen 20 % und 23 %. Wie für die Stoßlüftung beobachtet, liegen die Ergebnisse aller Tracergase unter dem SF_6-Referenzwert von 1,89 h^{-1} mit Abweichungen zwischen -3 % (HFB mit 1,83 h^{-1}) und bis zu -34 % (CO_2 Testo, 1,25 h^{-1}) (siehe Tabelle 22).

Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft (Δ_T) in dieser Messreihe nur wenig zwischen 15 und 17 °C variierte, lässt sich kein belastbarer Zusammenhang zur Entwicklung der LWR innerhalb der Reihe feststellen. Zu einem möglichen Zusammenhang zwischen kleiner Schwankung von Δ_T und der Variationskoeffizienten innerhalb der Messreihe (siehe Kapitel 6.1 und Abbildung 24).

Für dieses Mess-Szenario wird ein Trend beobachtet, der in Kapitel 6.1 ausführlicher beleuchtet wird: Alle Messungen, die bei höheren LWR durchgeführt wurden, zeigen für SF_6 die höchste mittlere LWR gefolgt von N_2O, CO_2 und CO_2 Testo in absteigender Reihenfolge.

Abbildung 24: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei Kipplüftung. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 22: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei Kipplüftung

LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW [h^{-1}]	1,89	1,59	1,43	1,25	1,83	1,69	1,32
RSD [%]	8	8	10	6	20	23	20
Abw. zu SF_6 [%]	0	-16	-24	-34	-3	-11	-30

Quelle: Eigene Daten

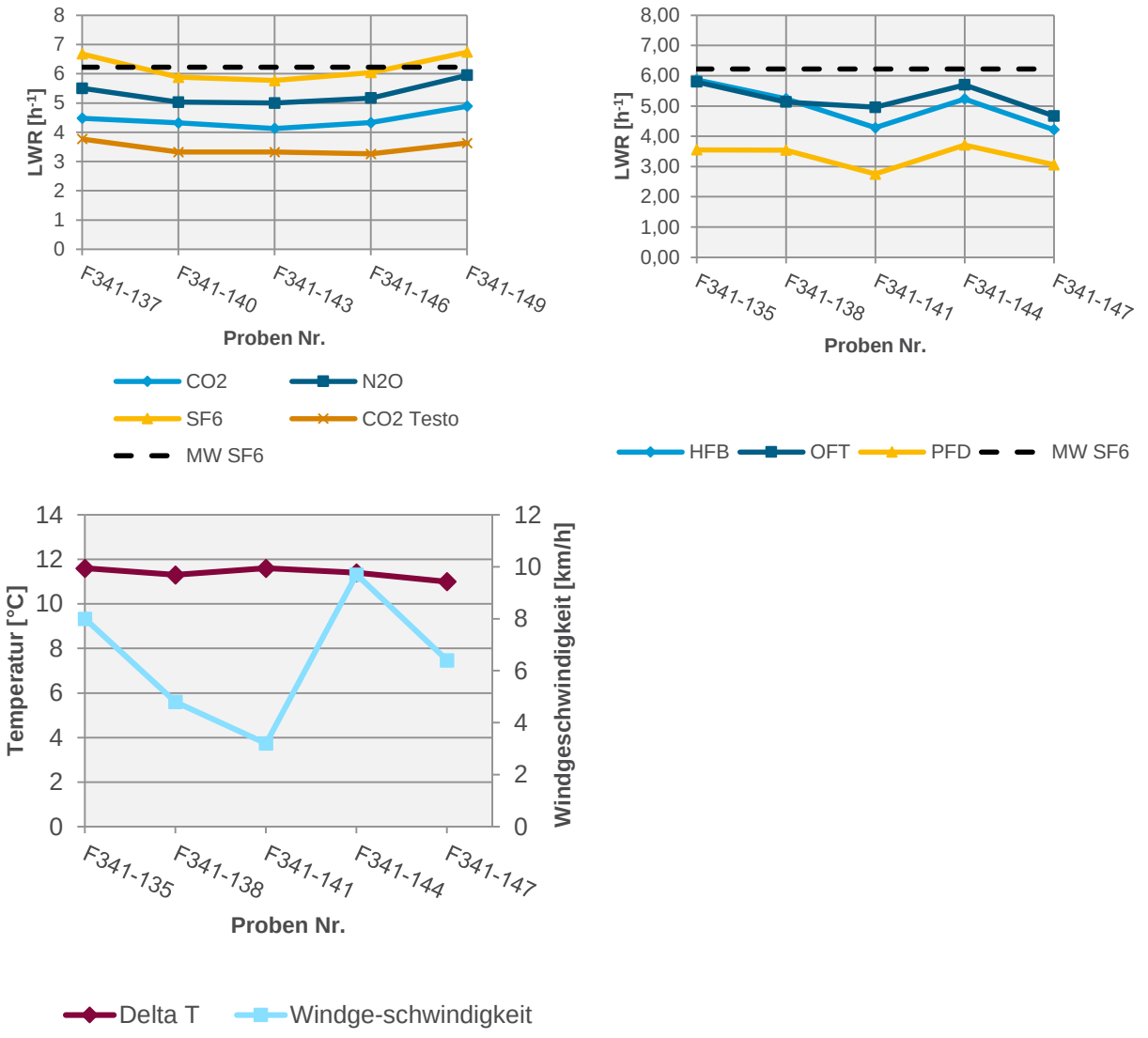
4.2.8 Lüftungsszenario: Geöffnetes Fenster

Für die Abkling-Methode liegt die Variabilität der Messungen mit RSD-Werten zwischen 6 und 7% im angestrebten Bereich. Die Ergebnisse der PFT-Methode schwanken etwas stärker mit RSD-Werten zwischen 9 % und 14 %. Wie für die beiden anderen Szenarien mit teilweise geöffneten Fenstern beobachtet, liegen die Ergebnisse aller Tracergase deutlich unter dem SF_6-Referenzwert von 6,22 h^{-1} mit Abweichungen zwischen -14 % (N_2O mit 5,33 h^{-1}) und bis zu -47 % (PFD, 3,32 h^{-1}) (siehe Tabelle 23).

Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft (Δ_T) in dieser Messreihe nur wenig zwischen 11 und 12 °C variierte, lässt sich kein belastbarer Zusammenhang zur Entwicklung der LWR innerhalb der Reihe feststellen. Zu einem möglichen Zusammenhang zwischen kleiner Schwankung von Δ_T und der Variationskoeffizienten innerhalb der Messreihe (siehe Kapitel 6.1 und Abbildung 25).

Für dieses Mess-Szenario wird ein Trend beobachtet, der in Kapitel 6.1 ausführlicher beleuchtet wird: Alle Messungen, die bei höheren LWR durchgeführt wurden, zeigen für SF_6 die höchste mittlere LWR gefolgt von N_2O, CO_2 und CO_2 Testo in absteigender Reihenfolge.

Abbildung 25: Gemessene LWR und Klimadaten im Realraum bei geöffnetem Fenster. Links: Abklingmethode; rechts: PFT-Methode; unten: Verlauf des Temperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle 23: Mittelwerte der gemessenen LWR und zugehörige Standardabweichungen aus den fünf Messungen bei geöffnetem Fenster

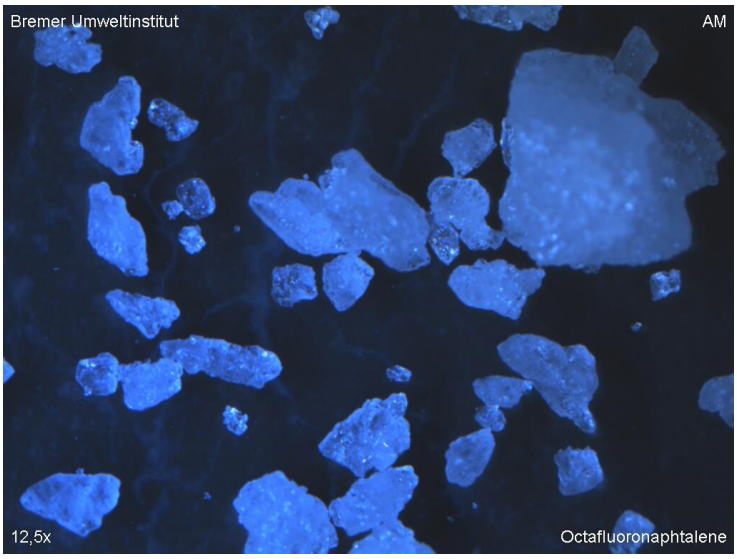
LWR	SF_6	N_2O	CO_2	CO_2 (Testo)	HFB	OFT	PFD
MW [h^{-1}]	6,22	5,33	4,43	3,46	4,97	5,25	3,32
RSD [%]	7	7	6	7	14	9	12
Abw. zu SF_6 [%]	n. a.	-14	-29	-44	-20	-16	-47

Quelle: Eigene Daten

5 Eignung eines emittierenden Feststoffes (Perflournaphthalin) als Tracergas – erste Ergebnisse

Ergänzend zu den Untersuchungen flüssiger Perfluorcarbonverbindungen als Tracerquelle in Luftwechselratenbestimmungen, wurden erste Versuche unternommen, einen Feststoff als Quelle einzusetzen. Hierfür wurde Perfluornaphthalin ausgewählt, ein kristallines Pulver (siehe Abbildung 26), das als kondensierte Form von HFB abgeleitet werden kann. Der Siedepunkt liegt leicht unter dem von Naphthalin, von dem bekannt ist, dass es bei Raumtemperatur sublimiert.

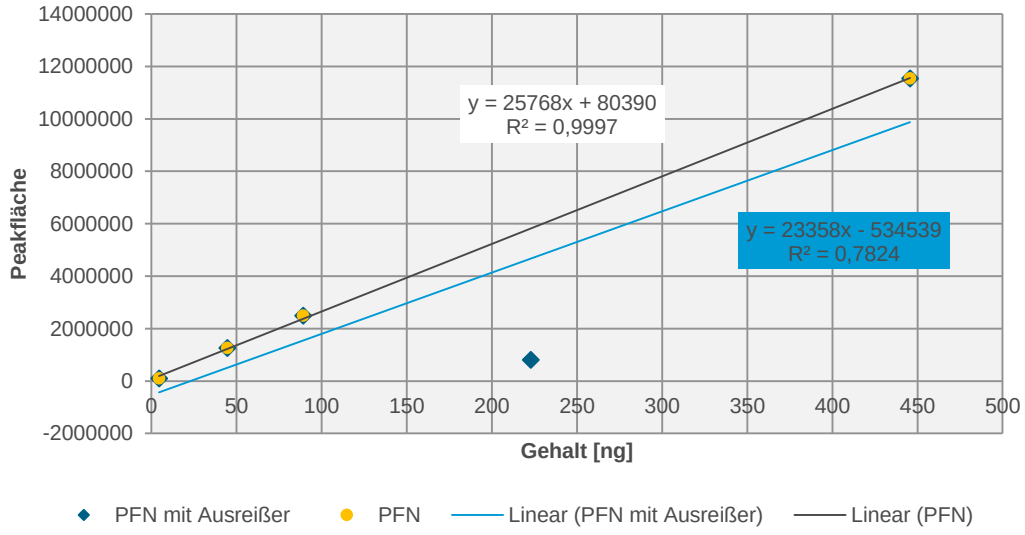
Abbildung 26: Mikroskopisches Bild einzelner Kristalle des Feststoffes Perfluornaphthalin



Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

Für die analytische Auswertung wurde die oben beschriebene, validierte PFT-Methode angewandt, die für PFN in einem Konzentrationsbereich von 2–223 µg/m³ kalibriert wurde. Wie in Abbildung 27 ersichtlich, wurde in der Kalibrierung ein stark abweichender Wert (Ausreißer) bei einer Konzentration von 111 µg/m³ beobachtet. Dieser wurde bei der Bestimmung der Kalibriergeraden ausgeschlossen.

Abbildung 27: Fünfpunkt-Kalibrierung von PFN



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Aufgrund der sehr geringen Emissionsraten konnten die bisher verwendeten Emissionsquellen nicht für PFN-Messungen eingesetzt werden. Für die Ermittlung der Luftwechselraten wurden daher Emissionsröhrchen hergestellt, die aus einem einfachen Vial mit Schraubverschluss bestanden (siehe Abbildung 2). Die Bezeichnung wurde auf die Abkürzung V mit fortlaufender Nummerierung festgelegt. Das Volumen des Vials richtete sich nach der Höhe der gewünschten Emissionsrate. Es wurden Vials mit Volumina von 2 mL (V1) und 9 mL (V2) eingesetzt. Der Feststoff PFN wurde in das Vial eingefüllt bis der Boden bedeckt war.

In Tabelle 24 sind die mittleren Emissionsraten und wo verfügbar auch die relativen Standardabweichungen über den Verwendungszyklus angegeben. Mit dem gewählten einfachen Aufbau konnten im Prinzip Emissionsquellen hergestellt werden, die eine ähnliche Konstanz (RSD) aufwiesen wie sie für die anderen Aufbauten in Abschnitt 3.2.1 bestimmt wurden. Dies gilt jedoch nur für Lagerung bei gleichen Bedingungen sowohl hinsichtlich Temperatur als auch Luftbewegung. Während z. B. die Emissionsröhrchen für HFB im Realraum, in der Kammer und unter dem Abzug ähnliche Emissionsraten aufwiesen, zeigt sich für die offenen Vials eine starke Schwankung je nach Aufbewahrungsort. Vor diesem Hintergrund können die gewählten PFN-Quellen zwar im kontrollierten Laborbetrieb für erste Messungen eingesetzt werden, sind jedoch für eine Anwendung in einer realen Mess-Situation in dieser Form nicht geeignet.

Tabelle 24: Über den Verwendungszyklus gemittelte Emissionsraten der PFN Emissionsröhrchen mit Angabe des RSD

Mess-Szenario	Mittlere Temperatur am Messtag [°C]	V1 [µg/h] (RSD %)	V2 [µg/h] (RSD %)
Vorversuch	n. a.	19 (18)	n. a.
Kammer 1,0 h^{-1}	22	42 ([a])	n. a.
Stufe 0 (1. Messung)	20	n. a.	68 (10)
Lagerung unter Abzug	n. a.	n. a.	121 (15)
Stufe 0 (2. Messung)	21	n. a.	50 ([a])

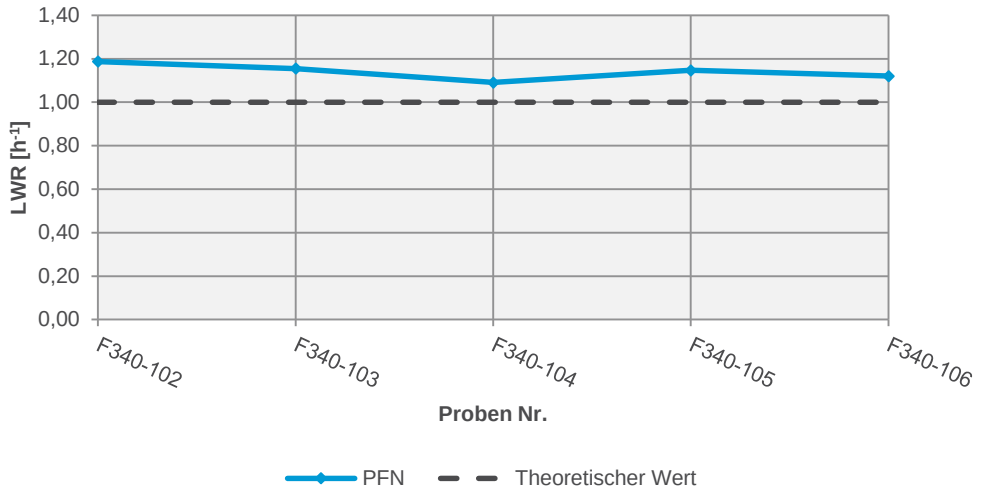
Quelle: Eigene Daten

a) Aufgrund von Messplanung und Umorganisation im Labor nur eine Emissionsrate für den Verwendungszyklus vorhanden.

Als erste Messversuche wurden sowohl Kammermessungen in einer 250 L-Kammer mit voreingestellter LWR von 1 h^{-1} als auch Realraummessungen bei Lüftungsstufe 0 durchgeführt. Ablauf, Probenahme und Auswertung erfolgten wie in Kapitel 3.4 für die Kammermessung und in Kapitel 3.2.4 für Realraum-Messungen beschrieben. Die Emissionsraten wurden, wie in Tabelle 24 angegeben, verwendet.

Die Messreihe in der 250 L-Kammer lieferte stabile Werte im Bereich des Sollwertes. Die Wiederfindungsraten, bezogen auf die berechnete Kammerluftkonzentration, lagen bei 109-119 %. Der RSD, über die fünf ausgeführten Messungen, lag bei 3 % mit einer Abweichung vom Sollwert von +14 % (siehe Abbildung 28).

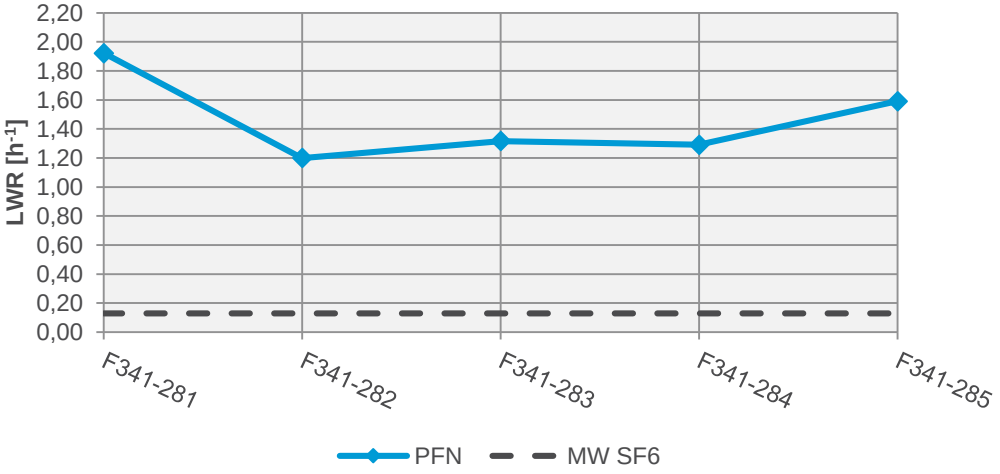
Abbildung 28: Gemessene LWR (PFN) in der 0,25 m³-Prüfkammer bei eingestellter LWR von 1 h^{-1}.



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Die Messreihe im Realraum wies eine stärkere Variabilität mit einem RSD von 20 % auf. Vor allem lagen jedoch die berechneten Luftwechselraten um einen Faktor von 11 über dem SF_6-Referenzwert (vgl. Abbildung 29). Um einen Messfehler auszuschließen, wurde die Messreihe wiederholt. Das Ergebnis bestätigte jedoch im Wesentlichen die erste Messreihe (gemittelte LWR 1. Messreihe 1,46 h^{-1}, 2. Messreihe 1,33 h^{-1}). Warum die gemessenen Luftkonzentrationen so niedrig liegen und damit die LWR so überschätzt wird, ist derzeit noch unklar und wurde im Rahmen des Projektes nicht mehr weiter untersucht.

Abbildung 29: Gemessene LWR (PFN) im Realraum bei Lüftungsstufe 0.



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Genauigkeit und Fehlerquellen bei der Bestimmung von Luftwechselraten

Die Messunsicherheiten und Fehler für die Methoden und Tracergase, die hier eingesetzt wurden, werden in der Literatur in einem weiten Bereich angegeben. Die Ursache für die weite Streuung der Angaben liegt nicht zuletzt darin, dass unterschiedliche Faktoren in die Messunsicherheiten und Fehlerbetrachtung einbezogen wurden und keine einheitlichen Referenzpunkte verwendet wurden. Zudem gibt es eine Vielzahl an Parametern, in denen sich die Messungen im Detail unterscheiden, die Einfluss auf die gemessene Luftwechselrate haben. Hierzu zählen unter anderem Eigenschaften des Tracergases, eingesetzte Messgeräte, aktive oder passive Injektion und Probenahme, Auswertezeitraum und –methoden, Position von Ausgabe- und Probenahme der Tracergase, Durchmischung im Raum, Geometrie der Emissionsquellen bei PFT-Methode und Zufluss in die gemessene Zone aus angrenzenden Bereichen, die den meist benutzten Ein-Zonen-Ansatz beeinträchtigen.

Genauigkeit der Tracergase in Kammer und Realraum

Für die **Abklingmethode mittels SF_6** werden sowohl Über- als auch Unterschätzung der gemessenen Luftwechselraten in einem Bereich von -13 % bis +16 % (vgl. z. B. Chao 2004, Chao 2014) beschrieben. Bennett 2011 gibt einen Fehler aus Literaturdaten von 20-30 % an, Dietz 1982 beschreibt eine Messunsicherheit für die SF_6-Abklingmethode von 15 %, Dols 1995 gibt eine Ungenauigkeit von 10 % an. In Almeida 2017 wird auf die hohe Variabilität der Messungen mit Variationskoeffizienten von 30-57 % hingewiesen.

In unseren Daten liefert die Konzentrations-Abklingmethode mit SF_6 als Tracergas die stabilsten und besten Ergebnisse. In den Validierungsmessungen in der Prüfkammer liegt der maximale Variationskoeffizient bei 3 %, in den Realraummessungen bei 12 %. Die prozentualen Abweichungen von den Sollwerten liegen in der Kammer maximal bei 1 % und im Realraum bei max. 7 % (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32). Damit wurden in dem von uns gewählten Messaufbau höhere Genauigkeiten und geringere Variationskoeffizienten gefunden als in den oben genannten Literaturstellen.

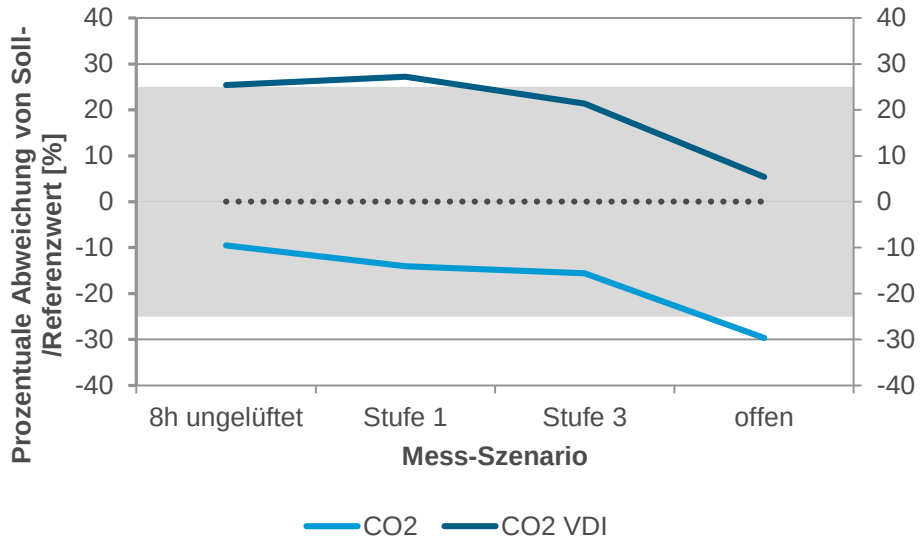
Für die **Konzentrations-Abklingmethode mit N_2O** als Tracergas liegen kaum Literaturdaten vor (vgl. z. B. Grimsrud 1980, Niemelä 1991, Shaw 1984). In Grimsrud 1980 wurde ein ähnlicher Trend beobachtet wie in unseren Daten, die N_2O-Resultate lagen im dortigen Vergleich ca. 10 % unter den SF_6-Werten. In unseren Daten reiht sich N_2O bzgl. der Genauigkeit zwischen SF_6 und CO_2 ein mit einer Tendenz zur Unterschätzung der LWR.

Die Variabilität der N_2O-Messreihen in der Prüfkammer ergibt Variationskoeffizienten von 3 %, die maximale Abweichung vom Sollwert der LWR liegt bei -15 %. In den Realraummessungen liegen die Variationskoeffizienten für die drei Messreihen mit den niedrigsten Luftwechselraten und starken Schwankungen der Temperaturdifferenz innen-außen bei bis zu 20 % (vgl. Abbildung 33). Für die verbleibenden Messreihen werden maximale RSD-Werte von 9 % beobachtet. Die Abweichungen von Soll- und Referenzwerten liegt im Mittel bei -13% mit einem Maximalwert von -24% und damit im akzeptablen Bereich.

CO_2 wird in der evaluierten Literatur gelegentlich als Tracergas für die **Abklingmethode** eingesetzt (häufiger z. B. metabolisches CO_2 Gleichgewichtsmethode). Zudem wird oft ein einfacherer und günstigerer CO_2-IR-Sensor eingesetzt, während in unseren Daten auch für CO_2 ein photoakustischer Monitor zum Einsatz kam. Für die CO_2-Abklingmethode mit Sensor oder Spektrometer wurde in Cui 2015 bei optimalen Bedingungen und Auswertung über die Regressionsmethode ein Fehler von 5 % bestimmt, durch falsch positionierte Probenahme oder falsch gewählten Auswertezeitraum können zusätzlich Fehler bis 28 % resp. 10 % entstehen. Sekhar 2004 fand eine Unterschätzung der LWR durch CO_2 im Vergleich zu SF_6 von bis zu 27 %.

Die Auswertung unserer Daten hat für CO_2, vor allem bei Detektion mit dem einfacheren IR-Sensor, im Vergleich der Abklingmethoden die Werte mit der größten prozentualen Abweichung von Soll- und Referenzwerten ergeben. Während die Streuung der Ergebnisse mit max. 4 % RSD in den Kammermessungen und max. 12 % in den Realraum-Messungen akzeptabel ist, weichen die Ergebnisse bei steigender LWR immer weiter nach unten von Soll- und Referenzwert ab (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32, max. Abweichung CO_2 -31%, CO_2 Testo -57%). Dies resultiert unter anderem auch aus der Problematik hoher Hintergrundkonzentrationen und der daraus resultierenden Schwierigkeit, eine optimale Auswertung zu finden (vgl. Abschnitt 3.3.1). Mit der von uns gewählten Auswertung werden die LWR für CO_2 systematisch unterschätzt, mit der in VDI 4300 Blatt 7 zunächst überschätzt. Um das Verhältnis bei höheren LWR zu untersuchen, wurden weitere Messungen mit beiden Methoden ausgewertet. Da der relative Abstand zwischen den Auswertemethoden konstant bleibt, werden ab einer bestimmten LWR mit der VDI-Methode die besseren Übereinstimmungen mit den Sollwerten erreicht. Dennoch bleiben beide Varianten deutlich fehlerbehaftet (vgl. Abbildung 30). Unsere Ergebnisse bestätigen damit die Beobachtungen in Sekhar 2004.

Abbildung 30: Darstellung der prozentualen Abweichung von Soll- und Referenzwerten für CO_2 – erweiterter Vergleich der Auswertemethoden



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Zur **Genauigkeit der PFT-Methode** liegen diverse Studien vor, wobei eine Mehrzahl sich auf Ergebnisse mittels passiver Probenahme bezieht. In den Studien, die eine aktive Probenahme verwendet haben, wird bei Dietz 1982 ein RSD von 15 % benannt, Cheong 1995 fand eine Unterschätzung der Luftwechselrate bei aktiver Probenahme vs. Resultate eines direktanzeigenden Geräts von 7 % und auch Bennett 2011 gibt eine Unterschätzung der LWR bei aktiver Probenahme an.

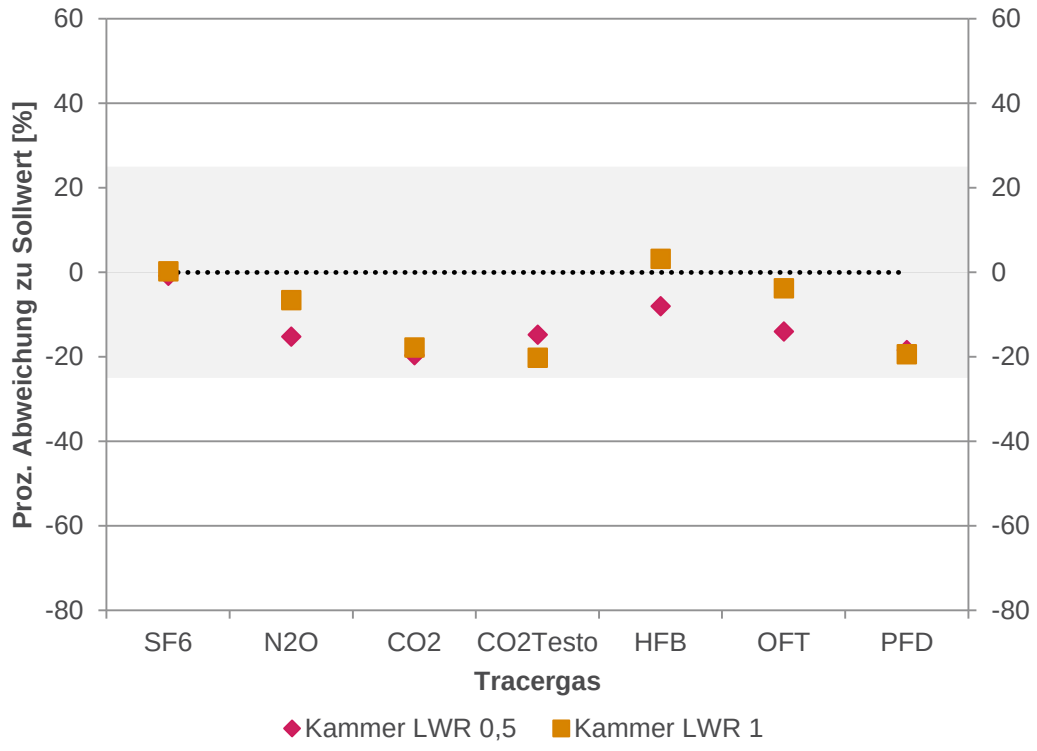
In den Kammermessungen lagen die Ergebnisse unserer Studie für alle drei PFT innerhalb der angestrebten Genauigkeit. Die Ergebnisse wurden mit einer Variabilität von unter 10 % RSD bestimmt, die Abweichung von den Sollwerten lag jeweils bei unter 19 % mit einer Tendenz zur Unterschätzung in der Reihenfolge LWR HFB>OFT>PFD.

Für die Messungen im Realraum wurde z. T. eine hohe Variabilität gefunden, RSD-Werte lagen zwischen 3 % und 57 %. Aus Abbildung 33 lässt sich entnehmen, dass RSD-Werte bis zu 25 % mehrfach beobachtet wurden. Die größte Variabilität mit RSD-Werten von 31 % für HFB, 56 % für OFT und 57 % für PFD findet sich jedoch für diejenigen Messreihen, in denen die Luftwechselraten niedrig waren und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft im Verlauf der Messungen am stärksten

schwankte. Da die Temperaturdifferenz als ein treibender Faktor für die Luftwechselrate bzgl. Infiltration diskutiert wird (vgl. z. B. Howard-Reed 2002, Nabinger 2011), könnte dieser Effekt hier beteiligt sein. Für eine statistische Absicherung reichen die vorliegenden Daten jedoch nicht aus. Ebenso kann aus den vorliegenden Daten nicht unterschieden werden, ob die RSD-Werte tatsächlich durch diesen Effekt beeinflusst werden oder ob sich diese Beobachtung daraus ergibt, dass bei niedrigen LWR bereits geringe Schwankungen der gemessenen LWR die relative Standardabweichung deutlich erhöhen.

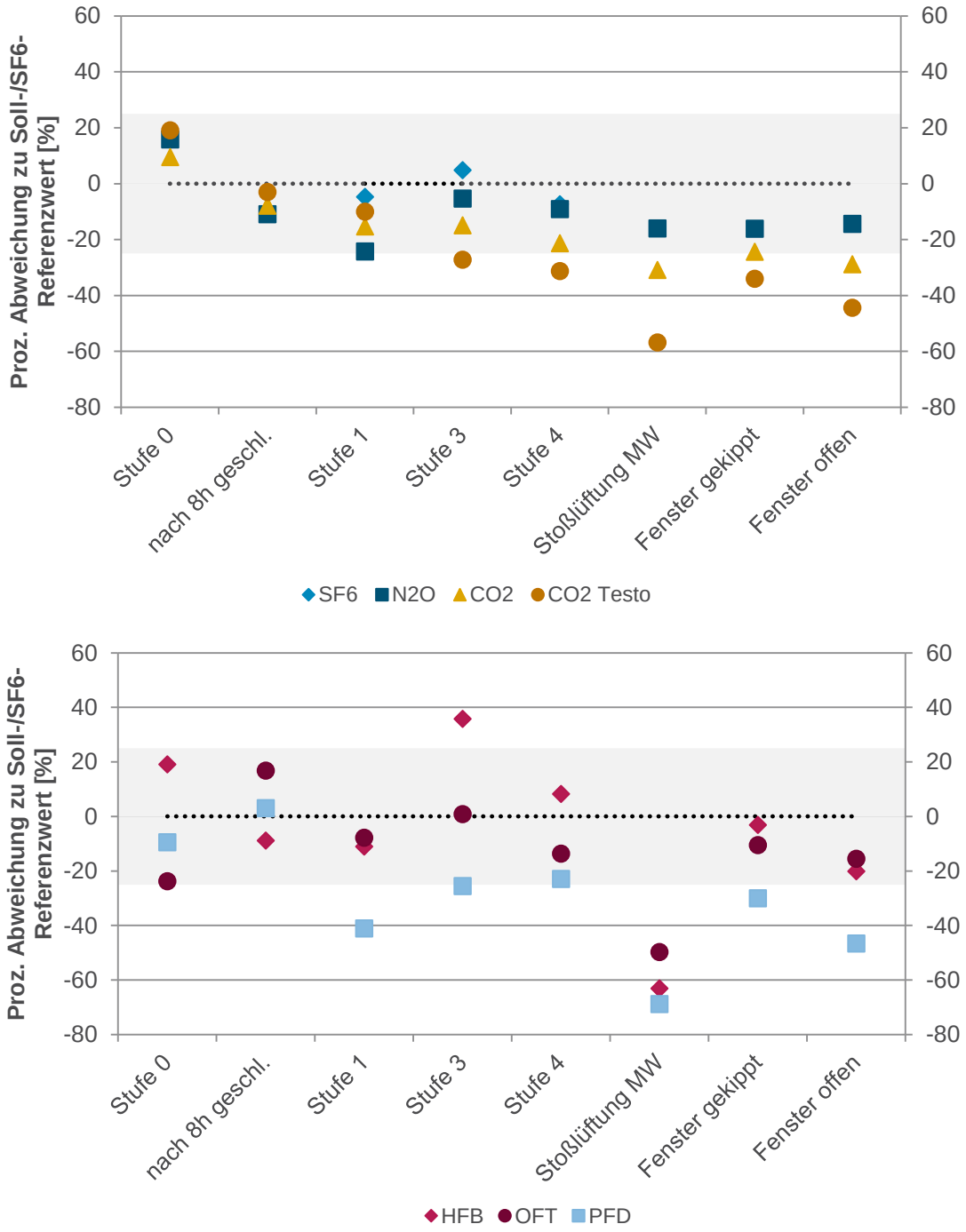
Bzgl. der Genauigkeiten ergibt sich aus den Messreihen kein einheitliches Bild für die drei PFT (vgl. Abbildung 32). Die größten Abweichungen vom SF_6-Referenzwert (-63 % HFB, -50 % OFT, -69 % PFD) werden für das Mess-Szenario Stoßlüftung beobachtet. Gerade in diesem Szenario ist ein Vergleich zwischen Abkling- und PFT-Methode schwierig, da die Auswertung nur über den Umweg der gewichteten Mittelwertbildung in der Abklingmethode möglich wird. Werden die Fehler bezogen auf Soll- und Referenzwerte ohne dieses Mess-Szenario betrachtet, so finden sich noch einzelne hohe Abweichungen von bis zu 36 % (HFB), -24 % (OFT) und -47 % (PFD). Im Mittel liegen die Abweichungen für HFB mit 11 % und OFT mit -7 % in einem guten Bereich. Für PFD bestätigt sich die Tendenz zur Unterschätzung der LWR im Mittel von -30 %.

Abbildung 31: Prozentuale Abweichung der Luftwechselraten vom Sollwert (voreingestellte Luftwechselrate in der Kammer) – Mittelwert über fünf Messungen pro Tracergas



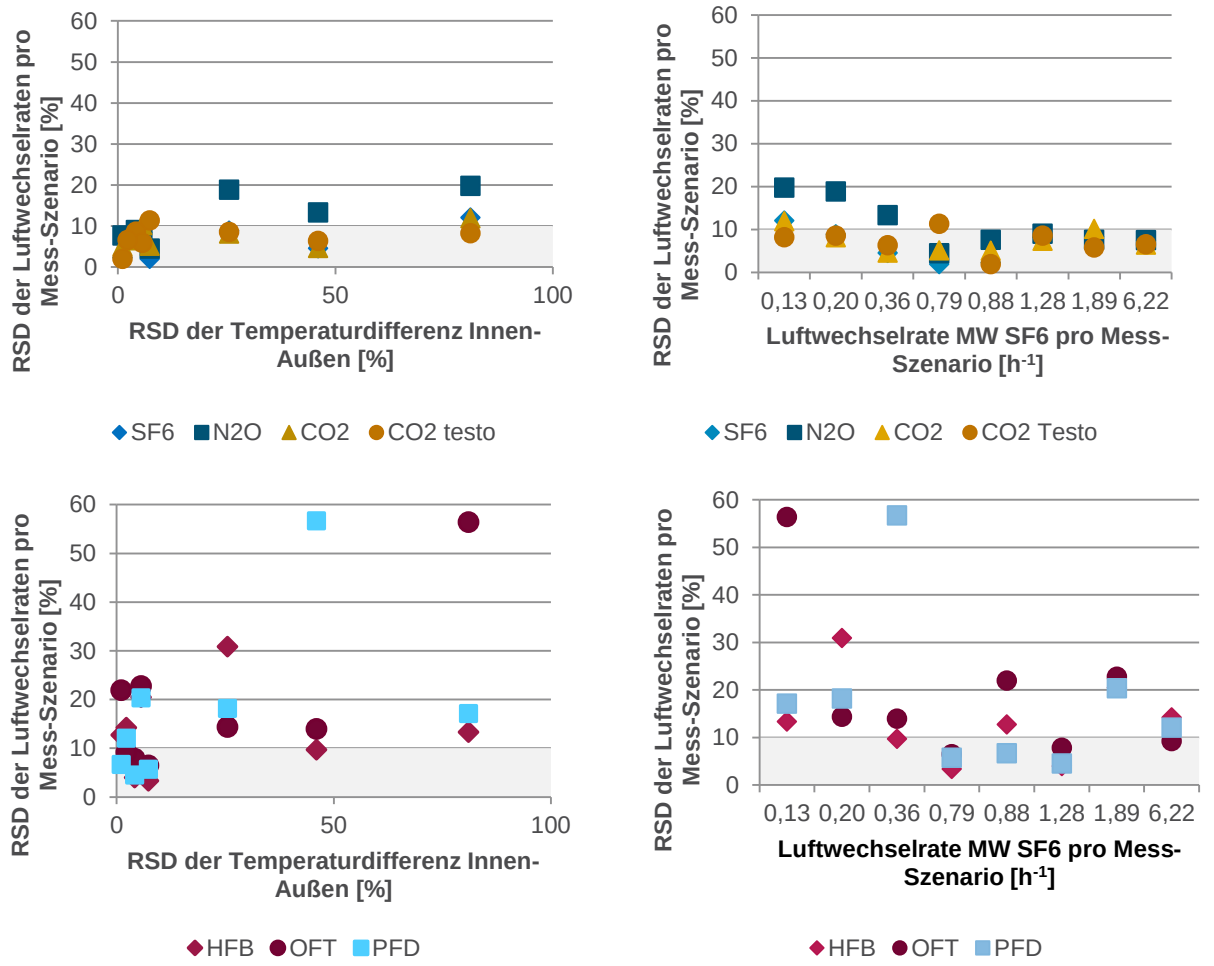
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 32: Prozentuale Abweichung der Luftwechselraten vom Sollwert (eingestellte Lüftungsstufe im Realraum) oder SF_6-Referenzwert – Mittelwert über fünf Messungen pro Tracergas. Oben: Abklingmethode; unten: PFT-Methode



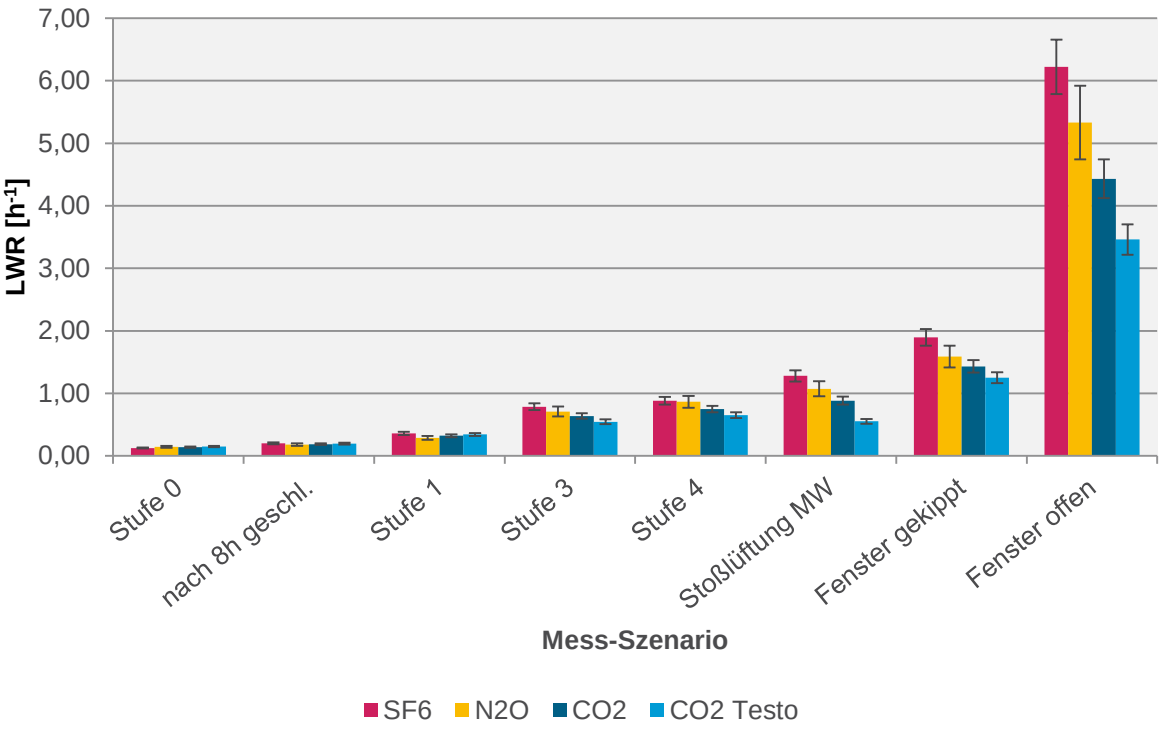
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 33: Links: Zusammenhang zwischen Schwankungen des Temperaturgradienten (innen-außen) und RSD der LWR pro Messreihe. Rechts: Zusammenhang zwischen Höhe der LWR und RSD der LWR pro Messreihe



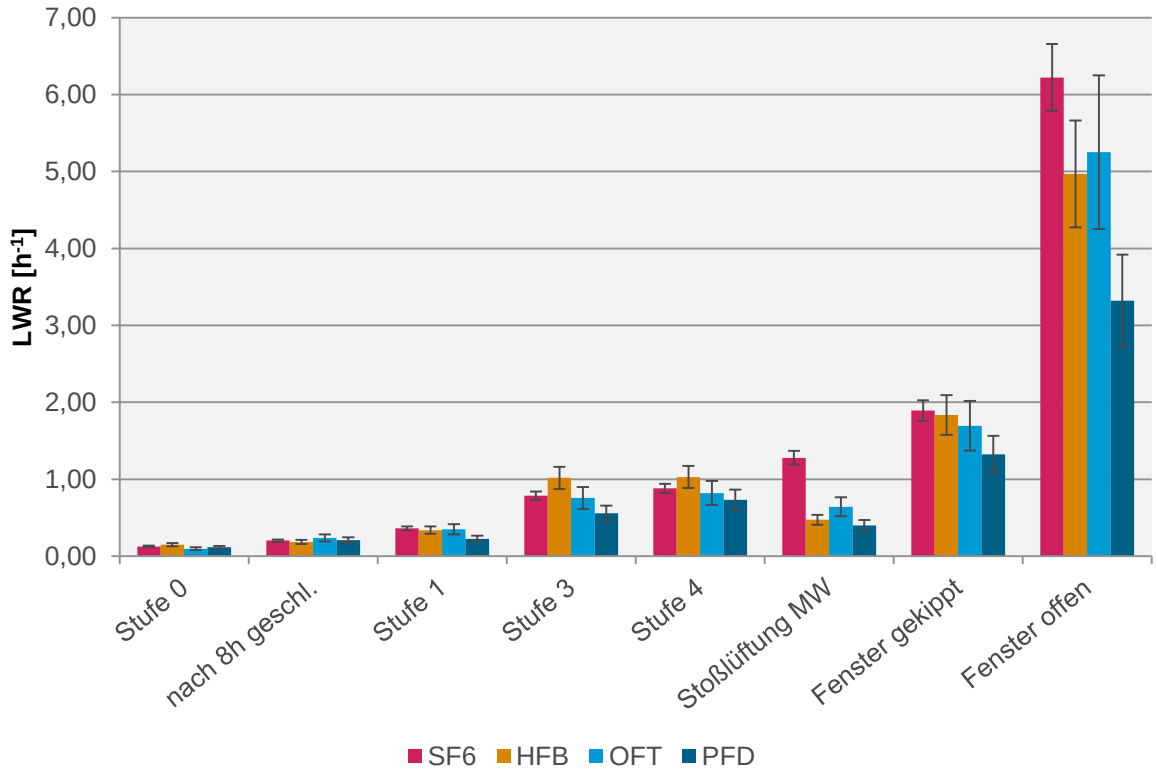
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 34: Mittlere LWR (mit Darstellung der mittleren relativen Standardabweichungen) bestimmt mittels Abklingmethode – Übersicht über alle Mess-Szenarien



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung 35: Mittlere LWR (mit Darstellung der mittleren relativen Standardabweichungen) bestimmt mittels PFT-Methode – Übersicht über alle Mess-Szenarien



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Im direkten Vergleich der berechneten Luftwechselraten (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35) bestätigen sich die bereits für die einzelnen Gase diskutierten Tendenzen. Innerhalb der Abklingmethode ergibt sich bei steigender LWR eine deutliche Tendenz zu Unterschätzung der LWR durch N_2O und CO_2. Die LWR sinken in der Reihenfolge SF_6>N_2O>CO_2>CO_2 Testo ab, wobei SF_6 die beste Übereinstimmung mit den Sollwerten aufweist. Für CO_2 muss dabei eine mögliche Diskrepanz durch die gewählte Auswertemethode mitberücksichtigt werden. Auch die PFT-Methode weist im direkten Vergleich zu SF_6 eine Tendenz zur Unterschätzung der LWR bei steigender LWR auf. Diese Tendenz ist jedoch nicht so stringent wie innerhalb der Abklingmethode. Für HFB und OFT werden mit Ausnahme des Szenarios Stoßlüftung ausreichende Übereinstimmungen zu SF_6 ermittelt. Für PFD liegen die LWR deutlich niedriger, die Abfolge der LWR innerhalb eines Tracergases und der gewählten Mess-Szenarien stimmt für alle Gase überein (LWR Stufe 0<8 h<Stufe 1<Stufe3<Stufe 4<Stoßlüftung<Kippstellung Fenster<geöffnetes Fenster).

In der Literatur werden einige mögliche Fehlerquellen und Vorbedingungen für die Bestimmung von Luftwechselraten mittels Tracergasen diskutiert. Im Folgenden werden einige wesentliche dieser Aspekte in Hinblick auf unsere Daten erörtert.

Allgemeine Fehlerquellen

Ein wesentlicher Punkt ist zu bewerten, welche Anteile des Luftaustausches bei einer Tracergasmessung im Ergebnis enthalten sind. Wie in Kapitel 3.1 diskutiert, werden die in der Kammer gemessenen Luftwechselraten durch den Luftaustausch mittels aktiver Luftzufuhr (kontrolliert über Flowmeter) bestimmt. Ein ungewollter Austausch mit der umgebenden Luft ist durch den abgedichteten Aufbau und die Materialwahl als minimal anzunehmen. Für die Messungen im Realraum sind mehrere Beiträge zu erwarten. Neben der reinen Infiltration der Außenluft, die durch Blower-Door-Verfahren und Abdichtung soweit möglich minimiert wurde, ist ein Luftaustausch mit angrenzenden Gebäudebereichen zu erwarten. Da die Tür nicht abgedichtet werden konnte, um den Zugang zum Raum im Alltag zu ermöglichen (der Raum wurde außerhalb der Messzeiten regulär genutzt), sind in den gemessenen Werten Beiträge hierdurch zu erwarten. Bestimmt werden die Werte bei eingeschalteter Lüftung jedoch durch diesen Beitrag. Dies bestätigt sich durch die gute Übereinstimmung zwischen Sollwert der Lüftung und gemessenen LWR mittels SF_6.

Durchgeführt und ausgewertet wurden die Messungen daher im Ein-Zonen-Ansatz. Prinzipiell ist für jede Mess-Situation zu hinterfragen, ob diese Näherung gerechtfertigt ist.

Eine Voraussetzung, die die Grundlage der gewählten Auswertungsmethoden ist, ist die Annahme der vollständigen Durchmischung von Raumluft und Tracergas im Messraum. Die gleichmäßige Durchmischung kann durch Messungen der Tracergaskonzentration und/oder LWR an verschiedenen Raumpositionen überprüft werden. Für die vorliegenden Daten wurden hierzu Messungen an drei Messpositionen durchgeführt und deren ausreichende Übereinstimmung nachgewiesen (vgl. Abschnitt 3.3.2.3). Gewählt wurde letztlich die Messposition in der Raummitte. Dies stimmt mit den Ergebnissen anderer Studien zur optimalen Messposition überein (vgl. z. B. Cui 2015).

Eine weitere Voraussetzung für die Gültigkeit der Auswertungsgleichungen ist, dass sich die LWR während der Messzeit nicht ändert (v. a. Abklingmethode) respektive die Tracergas-Konzentration im Gleichgewicht befindet (PFT-Methode). Bei starken und schnellen Schwankungen des Luftaustausches ist daher die Anwendbarkeit der Methoden zu überprüfen. Häufig lassen sich mittels Abklingmethode dynamische Szenarien besser messen, da ausreichend lange stabile Perioden des Luftaustausches vorliegen. Die PFT-Methode mit passiver Probenahme ist dagegen in Langzeitmessungen überlegen bei denen sich das notwendige Gleichgewicht über längere Zeit einstellt.

Gemäß den Ergebnissen mehrerer Studien sind bzgl. der Infiltration klimatische Parameter als treibende Kraft des Luftaustausches in unterschiedlichem Maße zu berücksichtigen (vgl. z. B. Persily 2016,

Almeida 2017, Persily 2016, Wallace 2002, Nabinger 2011, Bekö 2010, Chao 1997, Dietz 1982). Aus unseren Daten konnten dazu keine statistisch signifikanten Aussagen abgeleitet werden, da die Luftwechselrate im Wesentlichen über die gesteuerte Lüftung bestimmt wurde. Einige schwache Korrelationen für Mess-Szenarien ohne Lüftungssteuerung sind im Anhang dargestellt. Ob starke Schwankungen in der Temperaturdifferenz innen-außen die LWR beeinflussen und daher die Streuung der Daten erhöhen, kann nicht sicher belegt werden. Abbildung 33 liefert einen Hinweis hierauf, da es sich bei den Messungen mit starken Schwankungen von Δ_T zugleich um die Messungen mit den niedrigsten LWR handelt, kann es sich auch um einen rechnerischen Effekt handeln, da kleine Veränderungen der LWR die prozentual angegebenen RSD bereits stark beeinflussen können.

Fehlerquellen PFT-Methode

Einige Fehlerquellen sind methodenspezifisch zu betrachten. Für die PFT-Methode ist ein Parameter, der in die Berechnung mit eingeht, das effektive Raumvolumen des Messraums. In einem real genutzten Raum ist dieses nicht einfach zu bestimmen, da die Volumina der Einrichtungsgegenstände sowie mögliche Totvolumina nicht bekannt sind. In unserem Fall wurde wie in 3.1 beschrieben das Raumvolumen zunächst aus Bauplänen auf 41,5 m^3 bestimmt. Als effektives Volumen des Büroraumes wurde nach Abzug der Volumina von Regalen und Schränken 39,9 m^3 bestimmt und für alle Berechnungen verwendet.

Die Geometrie und Konstanz der Emissionsquellen stellt eine erhebliche Herausforderung für die PFT-Methode dar. In der Literatur finden sich hierzu verschieden aufwändige Lösungsansätze (vgl. z. B. Bjorling 2007, Cheong 1995, Dietz 1982, Shinohara 2010). In Abschnitt 3.2.1 und Kapitel 0 werden die Varianten beschrieben, die in unseren Messungen zum Einsatz kamen. Alle eingesetzten Varianten wurden ohne aktive Temperaturkontrolle und ohne weitere Temperaturkorrektur verwendet. Dies war in den vorliegenden Messungen möglich, da die Messungen in kontrollierter Umgebung stattfanden und die Emissionsraten jeweils für separate Messzyklen mit gleichbleibender Messtemperatur bestimmt wurden. Für den Einsatz in realen Mess-Situationen muss die Abhängigkeit der Emissionsraten vom Temperaturverlauf bekannt sein und berücksichtigt werden.

Die analytische Genauigkeit spielt bei der Auswertung der entnommenen Luftproben eine zentrale Bedeutung. In der vorliegenden Studie wurde daher eine umfangreiche Validierung durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2.2). Da die Empfindlichkeit der TD-GC/MS-Geräte über die Zeit Schwankungen unterworfen ist, wurden die üblichen Qualitätssicherungsmaßnahmen des Routinebetriebs durchgeführt und zusätzlich die gemessenen Probengehalte auf eine Wiederfindung des zugesetzten internen Standards von 100% umgerechnet.

Die Einstellung der Gleichgewichtskonzentration als Voraussetzung für Gültigkeit der Auswertungsgleichungen wurde bereits erwähnt. In Abschnitt 3.2.3 finden sich die Sättigungskurven, die für verschiedene Mess-Szenarien evaluiert wurden (notwendige Equilibrierzeit zwischen 2 und 6 Stunden je nach Gas und Lüftungsstufe). Die für die Realraum-Messungen gewählten Equilibrierzeiten über Nacht reichen demnach aus, um Gleichgewichtsbedingungen zu erreichen. Als problematisch einzuschätzen sind dagegen Szenarien mit stark schwankenden Luftwechselraten und Temperaturen. Durch die aktive Probenahme muss der Messzeitpunkt innerhalb des Mess-Szenarios jeweils angepasst werden, um den optimalen Zeitpunkt bzgl. Einstellung neuer Gleichgewichtszustände für die Probenahme zu wählen.

Die prinzipielle Eignung verschiedener PFT als Tracergase in der Bestimmung von LWR wurde in der Literatur mehrfach evaluiert (z. B. Bekö 2016, Bjorling 2007, Cheong 1995, Dietz 1982, Du 2012, Krooß 1997, Laussmann 2011). Mehrfach werden dabei auch Senkeneffekte als mögliche Fehlerquelle genannt. Treten Senkeneffekte auf, verringert sich die Wiederfindung emittierter Substanz in der Raumluft und die LWR wird überschätzt. Da in unseren Daten alle drei PFT zur Unterschätzung der

LWR (d.h. zu hohen Raumluftkonzentrationen) tendieren, konnten hier keine Senkeneffekte beobachtet werden. Die prinzipielle Eignung konnte zudem für alle drei PFT durch die Validierungsmessungen in der Kammer erbracht werden. Für PFD zeigt die detaillierte Auswertung in Kapitel 6.1 erster Unterpunkt eine eingeschränkte Nutzbarkeit im Realraum. Für HFB und OFT wurde die grundsätzliche Eignung belegt.

Fehlerquellen Konzentrations-Abklingmethode

Für eine valide Auswertung der Abklingmethode muss für die ausgewählten Tracergase eine schnelle Durchmischung mit der Raumluft erreicht werden. In unseren Messungen wurde daher ein Tischventilator während des Ausbringens der Tracergase eingesetzt, um diesen Prozess zu unterstützen. Aus Vorversuchen und Betrachtung der Abklingkurven ergibt sich für unseren Fall eine Zeit von ca. 10 min nach dem Ausbringen bis eine ausreichende Durchmischung erreicht ist und ein exponentieller Abfall der Tracergaskonzentration erkennbar ist.

Damit zusammen hängt die geeignete Wahl des Auswertezeitraums. Wie in Abschnitt 3.3.1 ausführlicher erläutert, wurde die ausgewertete Zeitspanne nach mehreren Kriterien gewählt: in halblogarithmischer Darstellung sollte Linearität gegeben sein, die Konzentration sollte bis maximal zur doppelten Hintergrundkonzentration abgefallen sein, alle Gase sollten zeitgleich auswertbar sein. Gewählt wurde die Methode der exponentiellen Regression für die gemessenen Konzentrationswerte. Die Zweipunktmethode liefert identische Werte bei idealem exponentiellem Abfall. Da dies in realen Mess-Situationen häufig schwierig zu bestimmen ist, können hier große Fehler auftreten (vgl. auch Cui 2015).

Bestimmend für den resultierenden Fehler der berechneten Luftwechselrate ist zudem die Messgenauigkeit und zeitliche Auflösung der eingesetzten Geräte. Generell sind dabei Querempfindlichkeiten der Messgeräte zu berücksichtigen. In unseren Messungen wurde für alle drei Tracergase (SF_6, CO_2 und N_2O) ein photoakustischer Monitor (Innova 1312) eingesetzt, der entsprechend kalibriert einen weiten Messbereich umschließt und hohe Genauigkeit mit wenig Geräteaufwand verbindet. Mit diesem Gerät ist zudem eine automatische Korrektur von Querempfindlichkeiten möglich. Im Vergleich zu den Messungen mittels eines einfacheren Handmessgeräts mit IR-Sensor (Testo 435) wurden mit dem photoakustischen Monitor die präziseren und weniger fehlerbehafteten Ergebnisse erzielt (vgl. Abschnitt 6.1 erster Unterpunkt). Der Messbereich bestimmt zudem die Menge an Tracergas, die für die Messung benötigt wird. Aus gesundheitlichen und ökologischen Aspekten sind daher Geräte mit niedrigen Nachweisgrenzen, wo technisch und aufwandsmäßig möglich, zu bevorzugen.

Die Eignung der gewählten Tracergase für die Bestimmung von Luftwechselraten wurde in der Literatur für SF_6 und CO_2 umfänglich evaluiert und bestätigt (vgl. z. B. Bennett 2011, Chao 2014, Chung 2001, Cui 2015, Dols 1995, Howard-Reed 2002, Lausmann 2011). Für N_2O liegen weniger Daten vor, evaluiert wurde N_2O als Tracergas jedoch z.B, in Grimsrud 1980, Niemelä 1991 und Shaw 1984. Für alle drei Gase sind Vor- und Nachteile beschrieben, während SF_6 sehr zuverlässige Ergebnisse erzielt (wie auch mit unseren Messungen bestätigt wurde) sprechen ökologische Kriterien für einen nur geringen Einsatz dieses Gases. Für CO_2 ergeben sich Probleme bei der Auswertung durch die hohen Hintergrundkonzentrationen. Diese sind für unsere Messungen bereits ausführlich in den Abschnitten 3.3.1 und 6.1 beschrieben worden. Methoden, die aus diesem Grund gezielt metabolisches CO_2 als Tracergas einsetzen, müssen einige andere Fehlerquellen kompensieren: Die CO_2-Produktion muss abgeschätzt werden, variiert jedoch von Person zu Person sowie in Abhängigkeit vom Aktivitätslevel. Da die Messungen in genutztem Zustand durchgeführt werden, können sich hieraus Störungen des Gleichgewichtszustands ergeben und in der Regel ist es nur schwer möglich die Zeit bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustands von mehreren Stunden mit gleichbleibender Besetzung und ohne Störungen zu gewährleisten. Bei Einsatz von N_2O sind dagegen gesundheitliche Aspekte zu bedenken sowie die gute Wasserlöslichkeit des Gases, die bei entsprechender Luftfeuchtigkeit zu Fehlern führen kann. In unse-

ren Ergebnissen wurden hier kaum störende Effekte beobachtet und die Qualität der Ergebnisse lag zwischen der von SF_6 und CO_2.

Ein großer Vorteil der Abklingmethode liegt darin, dass Luftwechselraten punktuell bestimmt werden können, eine Information über Schwankungen der LWR aus dem Abklingverhalten gewonnen werden kann und durch direktanzeigende Geräte auch ad-hoc Informationen verfügbar sind. Für Langzeitmessungen ist die Abklingmethode nur mit entsprechend hohem Aufwand einzusetzen, da hierfür programmierbare, automatisierte Injektionseinheiten sowie automatisierte Probenahme installiert und verfügbar sein müssen.

6.2 Welches Gas ist geeignet – gesundheitliche Aspekte und grundsätzliche Anforderungen

Aus den toxikologischen Daten, die in Abschnitt 2.2 diskutiert wurden, ergeben sich für einige Gase prinzipielle Hinweise auf unerwünschte gesundheitliche Effekte.

SF_6 ist auf Basis der vorliegenden Daten unter gesundheitlichen Aspekten gut als Tracergas geeignet. Die Konzentrationen, die für Luftwechselratenmessungen eingesetzt werden, liegen deutlich unter den Grenz- und Richtwerten. Messbereiche liegen je nach Methode zwischen 5 ppt und 100 ppm. In der vorliegenden Studie wurde mit Startkonzentrationen von 1-5 ppm gearbeitet. In VDI 4300 Blatt 7 wird empfohlen, dass sich während Messungen im ppm-Bereich nur das Messpersonal im Raum aufhält. Der MAK-Wert liegt bei 1.000 ppm. Generell gilt das Gas jedoch bis in hohe Konzentrationsbereiche (10.000 ppm und höher) als grundsätzlich kaum toxisch solange eine ausreichende Reinheit gewährleistet ist. Eine Reduktion der ausgebrachten Menge auf ein minimales Niveau sollte vor allem aus Gründen des Umweltschutzes erfolgen, da SF_6 mit einem GWP-Wert von 22.800 das stärkste Treibhausgas unter den untersuchten Tracergasen ist. Weitere Anforderungen an Tracergase wie chemisch inert, stabil, wenig Adsorption, geringe Hintergrundkonzentration, gut zu transportieren und zu messen werden von SF_6 erfüllt. Durch die hohe Dichte muss vor allem die Durchmischung mit der Innenraumluft durch unterstützende Maßnahmen gewährleistet werden.

CO_2 ist aus gesundheitlicher Sicht ebenfalls gut als Tracergas geeignet. Es ist für den menschlichen Körper kein Fremdstoff und kann bis in Bereiche von mehreren Tausend ppm vom Körper der meisten Menschen gut verarbeitet werden. Der Messbereich liegt je nach Messmethode zwischen 1 ppm und 5.000 ppm und reicht damit bis an den festgelegten MAK-Wert von 5.000 ppm heran. In der vorliegenden Arbeit wurden Anfangskonzentrationen von 2.000–3.500 ppm eingesetzt. Diese Konzentrationen wurden in einigen Studien bereits als Innenraumbelastungen z. B. in Unterrichts- oder Schlafräumen ermittelt (vgl. z. B. Frederiksen 2011, Laussmann 2011). Das Treibhauspotential ist mit einem GWP-Wert von 1 das niedrigste substanzspezifisch abgeleitete der eingesetzten Gase. Da die notwendigen Konzentrationen für LWR-Messungen mittels CO_2 in einem Bereich liegen, der in ungünstigen Innenraumsituationen auch als natürliche Belastung auftreten kann, ist es als akzeptabel anzusehen. Allgemeine Anforderungen an Tracergase wie ungiftig, stabil, geringe Adsorption, gut mischbar mit Luft, geringe Umwelteffekte und preiswert, werden daher von CO_2 erfüllt. Schwierigkeiten können sich bei der Auswertung von CO_2-Messungen zur Bestimmung von Luftwechselraten aus Querempfindlichkeiten der Messgeräte (vgl. Abschnitt 3.3.2.2), den hohen Hintergrundkonzentrationen sowie ggf. schwankenden Emissionen aus Innenraumquellen ergeben. Hier gibt es verschiedene Ansätze diese Fehlerquellen zu umgehen. In unserer Arbeit wurde der Weg gewählt mit hohen Anfangskonzentrationen die Auswertung nur bis zur doppelten Hintergrundkonzentration zu führen und die Querempfindlichkeit vom Gerät automatisch korrigieren zu lassen. Zudem waren während der Messung keine Personen im Raum anwesend. Besonders interessant ist unter den genannten Aspekten die Entwicklung von neuen Methoden, die auf der Auswertung von natürlicherweise vorhandenem, metabolischem oder atmosphärischem, CO_2 beruhen.

N_2O ist gemäß der bekannten Grenz- und Richtwerte bei LWR-Messungen mittels photoakustischem Monitor (Messbereich 0,03 ppm bis 5 ppm) ebenfalls nicht als gesundheitsschädlich für das Messpersonal eingestuft. Der Messbereich von IR-Sensoren (1 ppm bis 200 ppm) überschreitet den MAK-Wert von 100 ppm jedoch bereits. Zudem liegen zu N_2O einige widersprüchliche Bewertungen v. a. bzgl. der reproduktionstoxikologischen Relevanz vor. Dies sollte je nach Mess-Situation bedacht werden und vorsorglich sollten die eingesetzten Konzentrationen an den niedrigsten bekannten Richtwerten orientiert werden (z. B. NIOSH REL 25 ppm). In der vorliegenden Arbeit wurde mit Startkonzentrationen von 2,5–7 ppm gearbeitet. In VDI 4300 Blatt 7 wird darauf hingewiesen, dass aus Gründen des Gesundheitsschutzes während der Messung mit N_2O nur Messpersonal anwesend sein sollte. Das Treibhauspotential liegt mit einem GWP-Wert von 298 bereits im hohen Bereich, auch aus diesem Grund sollten die ausgebrachten Konzentrationen so gering wie möglich sein. Ein weiterer Faktor, der die Nutzbarkeit von N_2O einschränkt, ist die hohe Wasserlöslichkeit sowie ausgeprägte Adsorptionseffekte (vgl. auch VDI 4300 Blatt 7). Andere Anforderungen wie gut transportierbar und mischbar mit Luft sowie preiswert und gut erhältlich sind erfüllt.

Für die perfluorierten Tracergase liegen nur unzureichende toxikologische Daten vor. Generell ist unter den drei eingesetzten ungesättigten Verbindungen (HFB, OFT, PFN) HFB nach derzeitigem Stand das am wenigsten toxische. Alle drei sind gemäß EPA mit einem Standard-GWP-Wert von 1 zu werten und daher zusammen mit CO_2 unter den Tracergase am wenigsten klimaschädlich.

Da PFD als Arzneimittel Verwendung findet liegen hierfür zumindest für die parenterale Anwendung toxikologische Daten vor, die auf eine geringe Toxizität schließen lassen. Dafür ist das Treibhauspotential mit einem GWP-Wert von >7500 als hoch einzustufen.

Alle perfluorierten Tracergase sollten daher aus Vorsorge- und Umweltschutzgründen in den niedrigsten möglichen Konzentrationen eingesetzt werden. Durch die analytischen Methoden mit Nachweisgrenzen im Bereich von 10 ppt ist dies gut möglich. In den hier ausgewerteten Mess-Szenarien wurde mit Innenraumluftkonzentrationen von 0,001 ppm bis 0,01 ppm gearbeitet. Anforderungen wie chemisch inert, stabil, geringe Hintergrundkonzentrationen, geringe Querempfindlichkeit sowie preiswert werden erfüllt. Bzgl. der Transportierbarkeit sind die PFT den anderen Gasen überlegen, da sie bei Normalbedingungen als Flüssigkeit oder Feststoff transportiert werden können. Zur Mischbarkeit und Adsorption liegen wenig Daten vor, durch die relativ hohen molaren Masse muss jedoch von Senkeneffekten ausgegangen werden und eine gute Durchmischung ggf. technisch gewährleistet werden.

6.3 Praktische Schlussfolgerungen

Vom Grundsatz her werden die in VDI 4300 Blatt 7 beschriebenen Methoden auch derzeit in gleicher Form eingesetzt. Bereits in DIN EN ISO 16000-8 wurde die Notwendigkeit einer ausführlicheren Fehlerbetrachtung sowie die Erweiterung auf Räume, die keine einheitliche Zonen bilden, beschrieben und umgesetzt. Zudem sind in dieser Norm bereits zahlreiche praktische Aspekte ausführlicher betrachtet sowie der Multi-Zonen-Ansatz berücksichtigt. In Charlesworth 1988 (AIVC Richtlinie zur Messung von Luftwechselraten) sind viele Aspekte in einem übersichtlichen Format für Anwender aufbereitet. Einige Aspekte dieser Richtlinie bedürfen jedoch der inhaltlichen Anpassung an neu verfügbare Techniken und Methoden. Mit DIN EN ISO 12569 in der aktuellen Version von 2018 steht eine sehr ausführliche Norm zur Verfügung, die viele Aspekte, die in der vorliegenden Arbeit diskutiert werden, bereits berücksichtigt. Für die Methoden, die mit metabolischem CO_2 arbeiten, liegt mit ASTM D6245 ebenfalls eine 2018 neu überarbeitete Richtlinie zur Verfügung. Die Ausführungen dieses Abschnitts beziehen sich daher ausdrücklich auf VDI 4300 Blatt 7 und DIN EN ISO 16000-8.

Bzgl. der Wahl des Tracergases sind praktische, gesundheitliche und ökologische Aspekte wie in Abschnitt 6.2 beschrieben zu berücksichtigen.

Die Genauigkeiten und Fehlerquellen wie sie sich aus der Literatur und den vorliegenden Messungen ergeben haben, sind ausführlich in Abschnitt 6.1 beschrieben.

Neben den drei genannten grundsätzlichen Herangehensweisen (Konzentrations-Abklingmethode, Konstant-Injektionsmethode, Konstant-Konzentrationsmethode) gibt es demzufolge eine Vielzahl an Varianten und Details, die je nach Fragestellung für jede Messung bedacht werden müssen. Eine Übersicht über Faktoren, die hier zu bedenken sind, wäre in den Richtlinien hilfreich.

Prinzipiell sollte zwischen Langzeit- und Kurzzeitmessungen je nach Fragestellung unterschieden werden. Auch bei Kurzzeitmessungen sollte die Probenahmedauer aufgrund der Situation Vor-Ort geprüft und bewertet werden. Neben Hinweisen aus der Literatur zu theoretisch abgeleiteten optimalen Abklingzeiten (vgl. DIN EN ISO 12569, Cui 2015, Okuyama 2012) sind in diesem Zusammenhang z. B. die Dynamik des Luftaustausches und die klimatischen Bedingungen zu berücksichtigen.

Vor- und Nachteile passiver und aktiver Tracergas-Ausgabe sind je nach Fragestellung abzuwägen. Gleiches gilt für die Probenahme. Der Zonen-Ansatz sollte geklärt und überprüft werden, welche Anteile an Luftströmen im gemessenen Belüftungsstrom („Luftwechselrate“) enthalten sind. Hierzu wäre eine Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten wünschenswert.

Die Genauigkeit der Messmethode muss mit der Gesamtunsicherheit, die durch weitere Faktoren wie z. B. repräsentative Probenahme oder temperaturabhängige Emissionsraten der PFT-Methode entstehen, abgewogen werden. DIN ISO 16000-8 enthält bereits ausführliche Betrachtungen zur Messunsicherheit.

Der Aufbau der Emissionsröhrchen wie in VDI 4300 Blatt 7 beschrieben, hat sich nicht für alle eingesetzten Tracergase in der vorliegenden Studie bewährt. Auch in der Literatur liegt eine Vielzahl an Vorschlägen zur Geometrie der Emissionsquellen vor, häufig jedoch ohne ausreichende Details für eine Übernahme zu nennen. Hierzu sollten aus unserer Sicht weitere Arbeiten erfolgen, um eine einfachere Handreichung an Messende weiterzugeben.

Auch bzgl. der Auswertung kann eine ausführlichere Handreichung wie z. B. in DIN ISO 16000-8 und in den Nordtest-Methoden sinnvoll sein. Hier werden u.a. die Randbedingungen einer Auswertung mittels exponentiellem Abfall der Abklingkurven genauer beschrieben (halblogarithmische Darstellung, Festlegung des linearen Bereichs).

Bzgl. CO_2 musste in der vorliegenden Arbeit von der in VDI 4300 Blatt 7 beschriebenen Auswertung abgewichen werden. Da hier mit CO_2-Konzentrationen deutlich über dem Hintergrundwert gearbeitet wurde, ergaben sich bei Abzug der Hintergrundkonzentration vor Auswertung der Abklingkurven deutlich schlechtere Ergebnisse (vgl. Abschnitt 6.1). Zudem sind Methoden, die auf Messungen von metabolischem oder atmosphärischem CO_2 beruhen, bisher in der VDI-Richtlinie nicht beschrieben. Auch die Evaluation neuer Ansätze in dieser Hinsicht wäre wünschenswert, um Methoden mit geringem Einsatz von Treibhausgasen und ohne gesundheitliche Effekte zu integrieren.

VDI 4300 Blatt 7 enthält bereits Mindestanforderungen an das Messprotokoll, das für jede Messung zu führen ist. In DIN 16000-8 werden zusätzlich Anforderungen an den Prüfbericht aufgelistet. Aus unserer Sicht wäre eine Konsolidierung der Anforderungen in einem Dokument wünschenswert. Das Messprotokoll, das für die vorliegenden Messungen genutzt wurde, basiert auf VDI 4300 Blatt 7 und ist im Anhang beigefügt.

Neue Ansätze in der Bestimmung von Luftwechselraten sind in Kapitel 2.1.2 referenziert und sollten auf ihr Anwendbarkeit überprüft werden.

7 Quellenverzeichnis toxikologischer Daten

AwSV 2017; Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 905).

California PEL; 8 CCR section 5155, table AC-1, https://www.dir.ca.gov/title8/ac1.pdf, abgerufen am 01.04.2017.

ChemIDplus HFB; ChemIDplus a Toxnet Database, Suche nach CAS-Nummer 392-56-3, https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/392-56-3 abgerufen am 05.04.2017.

ChemIDplus PFN; ChemIDplus a Toxnet Database, Suche nach CAS-Nummer 313-72-4, https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/313-72-4 abgerufen am 01.07.2018.

CH Giftliste 2004; Bundesamt für Gesundheit, CH-3003 Bern, Giftliste 1 – Verzeichnis der giftigen Stoffe, Ausgabe 2003/2004.

Courtney, K. Diane; Andrews, James E. (1984): Teratogenic evaluation and fetal deposition of hexabromobenzene (HBB) and hexafluorobenzene (HFB) in CD-1 mice. In: Journal of Environmental Science and Health, Part B, Vol. 19(1), S. 83-94. DOI: 10.1080/03601238409372416.

Dilley, J.V. (1979): Acute Inhalation Toxicity of Perfluorodecalin, Octafluorotoluene, and Perfluorohexylsulfurpentafluoride in Rats. Final Report, SRI Project LSD-8044, National Technical Information Service Nr. PB81 156911. https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB81156911.xhtml

DuPont 1992; National Technical Information Service Vol. OTS0571186, Initial Submission: Acute Oral Toxicity of Hexafluorobenzene in Rats with Cover Letter dated 101592; DuPont Chem Submission to EPA.

ECHA biocide CO2; ECHA-Liste der zugelassenen Biozide mit Wirkstoff CO2, https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/biocidal-active-substances?p_p_id=echarevbiocides_WAR_echarevbiocidesportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_echarevbiocides_WAR_echarevbiocidesportlet_rml_id=100.004.271 abgerufen am 18.06.2018.

ECHA decision SF6; Dossierbewertungsentscheidung der ECHA zu Schwefelhexafluorid vom 05.02.2015, https://echa.europa.eu/documents/10162/9e09ac91-23f8-4f6f-93b3-6328112983d9

ECHA HFB; Infocard zum REACH-Registrierungsstand von Hexafluorbenzol, https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.006.252 abgerufen am 19.06.2018.

ECHA N2O; REACH-Registrierungsdossier zu Distickstoffmonoxid (Vollregistrierung), https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/14445 abgerufen am 13.06.2018.

ECHA OFT; Infocard zum REACH-Registrierungsstand von Perfluortoluol, https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.006.460 abgerufen am 22.06.2018.

ECHA PFD; REACH-Registrierungsdossier zu Perfluordecalin (Perflunafene), https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/25306 abgerufen am 28.06.2018.

ECHA PFD brief; Brief Profile in der ECHA-Chemikaliendatenbank zu Perfluordecalin (Perflunafene), https://echa.europa.eu/brief-profile/-/briefprofile/100.005.631 abgerufen am 28.06.2018.

ECHA PFN; Infocard zum REACH-Registrierungsstand von Perfluornaphthalin (Octafluoronaphthalene), https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.005.674 abgerufen am 01.07.2018.

ECHA SF6; REACH-Registrierungsdossier zu Schwefelhexafluorid, https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/13559 abgerufen am 01.06.2018.

EPA CompTox PFN; EPA Comptox Dashboard Suche nach CAS-Nr. 313-72-4, https://comptox.epa.gov/dashboard/dsstoxdb/results?utf8=%E2%9C%93&search=313-72-4 abgerufen am 01.07.2018.

EPA GHGRP 2014; Amendment to 40 CFR Part 98, Federal Register Vol. 79, No. 238, as of Thursday, December 11, 2014, Rules and Regulations, S.73750-73796.

EPSL 2018; Equine Prohibited Substances List 2018; Hg.: Fédération Équestre Internationale, Lausanne, Schweiz; https://inside.fei.org/sites/default/files/2018%20Equine%20Prohibited%20Substances%20List.pdf, abgerufen am 05.05.2018.

Fang, Zexu; Sonner, James, Laster Michael J.; Ionescu, Pompi; Kandel, Lori; Koblin, Donald D.; Eger II, Edmond I; Halsey, Michael L. (1996): Anesthetic and convulsant properties of aromatic compounds and cycloalkanes: implications for mechanisms of narcosis. In: Anesth. Analg. Vol. 83(5), S. 1097-1104. https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/1996/11000/Anesthetic_and_Convulsant_Properties_of_Aromatic.35.aspx abgerufen am 22.06.2018.

Fluoron Lit; Literaturverzeichnis zu PFD und PFO der Fa. Geuder AG, http://www.fluoron.de/Literatur_PFO_PFD abgerufen am 29.06.2018.

Fluoron PIL; Patienteninformation zu Fluoron F-Decalin der Fa. Geuder AG, Stand September 2003.

GESTIS CO2; Stoffdatenblatt CO2, IFA-GESTIS Stoffdatenbank http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001120.xml?f=templates&fn=print.htm&GLOBAL=G_&G_DIEXSL=GESTIS-PRINT.XSL abgerufen am 19.05.2018.

GESTIS N2O; Stoffdatenblatt N2O, IFA-GESTIS Stoffdatenbank, http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/004230.xml?f=templates&fn=print.htm&GLOBAL=G_&G_DIEXSL=GESTIS-PRINT.XSL abgerufen am 19.05.2018

GESTIS SF6; Stoffdatenblatt SF6, IFA-GESTIS Stoffdatenbank, http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/005220.xml?f=templates&fn=print.htm&GLOBAL=G_&G_DIEXSL=GESTIS-PRINT.XSL, abgerufen am 19.05.2018

HSDB N2O; Hazardous Substances Data Bank, a Toxnet Database; Suche nach “nitrous oxide” in http://toxnet.nlm.nih.gov abgerufen am 22.03.2017.

IGS CO2; Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 124-38-9; https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IGS HFB; Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 392-56-3; https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IGS N2O; Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 10024-97-2, https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IGS OFT; Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 434-64-0, https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IGS PFD; Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 306-94-5, https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 05.05.2018.

IGS PFN Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 313-72-4, https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IGS SF6, Suche in IGS-Public nach CAS-Nummer 2551-62-4, https://igsvtu.lanuv.nrw.de/igs_portal/oberfl/portal/formHtml/Datei.app?USER_ID=0&DATEI=login_maske.vm&P_IGS_HOME=/oberfl/portal&DATENBESTAND=PORTAL&sprache=de&oberfl=portal&P_PORTAL=1&INIT=1&LOGDATEI=login.cry, abgerufen am 19.05.2018.

IPCC 2007; Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Hg.) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Online abgerufen am 28.06.2018 von https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf.

Krantz, John C.; Rudo, Frieda G. (1966): The Fluorinated Anesthetics. In: Handbuch der experimentellen Pharmakologie Vol. XX/1, Kapitel 10, S. 516; Smith, Frank A. (Hg.) Springer Verlag Berlin-Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-25108-0.

MAK 2017; MAK- und BAT-Werte-Liste 2017: Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 53, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527812110.

MAK AT 2017; Verordnung des (österreichischen) Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz über Grenzwerte für Arbeitsstoffe sowie über krebserzeugende und fortpflanzungsgefährdende (reproduktionstoxische) Arbeitsstoffe (Grenzwerteverordnung 2011 – GKV 2011) mit Änderungen, Fassung vom 02.03.2018.

MAK CH 2016; Grenzwerte am Arbeitsplatz 2016, Suva Bereich Arbeitsmedizin (Hg.), Ausgabe Januar 2016, Bestellnummer 1903.d.

Monitoring-VO; VERORDNUNG (EU) Nr. 525/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG.

Mortelmans, Kristien E.; Simmon, Vincent F. (1979): In Vitro Microbiological Mutagenicity Assays of Eight Fluorocarbon Taggant Samples. Final Report, SRI Project LSC-8044, National Technical Information Service Nr. PB81 161135. https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB81161135.xhtml.

Nhachi, Charles F. B. (1986): Evidence for the inductive effects of hexafluorobenzene on hepatic microsomal enzymes in the male rat. In: Toxicology Vol. 39(3), S. 317-321. DOI: 10.1016/0300-483X(86)90031-4.

NIOSH REL CO2;NIOSH pocket guide for Carbon dioxide: https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0103.html abgerufen am 01.07.2018.

NIOSH REL N2O; NIOSH pocket guide for Nitrous Oxide: https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0465.html abgerufen am 01.04.2017.

NIOSH REL SF6; NIOSH pocket guide for Sulfur Hexafluoride: https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0576.html abgerufen am 01.07.2018.

PAC Rev. 29; Protective Action Criteria (PAC) Rev. 29 based on applicable 60-minute AEGLs, ERPGs, or TEELs. The chemicals are listed in alphabetical order. May 2016; https://sp.eota.energy.gov/pac/docs/Revision_29_Table2.pdf, abgerufen am 01.04.2017

Proposition 65 list; HSC Div. 20, Chapter 6.6 Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986, 25249.8. List Of Chemicals Known to Cause Cancer Or Reproductive Toxicity, https://oehha.ca.gov/media/downloads/proposition-65//p65list052518.pdf abgerufen am 15.06.2018.

Rietjens, Ivonne M.C.M.; Steensma, Aukje; Den Besten, Cathaline; van Tintelen, Gerrit; Haas, Jo; van Ommen, Ben; van Bladeren, Peter J. (1995): Comparative biotransformation of hexachlorobenzene and hexafluorobenzene in relation to the induction of porphyria. In: European Journal of Pharmacology: Environmental Toxicology and Pharmacology Vol.293(4), S. 293-299. DOI: 10.1016/0926-6917(95)90048-9.

Schnabel, Christian (2010): Entwicklung eines Beatmungsgerätes für die Total Liquid Ventilation kleiner Labortiere. Diplomarbeit. Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences. Mittweida.

SDB CO2 Praxair; Praxair Deutschland GmbH, D-40476 Düsseldorf, SDB 018A zu Kohlendioxid gemäß Artikel 31 REACH-Verordnung vom 15.06.2011.

SDB HFB Acros; Acros Organics BVBA, BE-2440 Geel; Sicherheitsdatenblatt ACR12054 zu Hexafluorbenzol, Revisionsnr. 3 vom 20.09.2013.

SDB HFB Alfa Aesar; Alfa Aesar Thermo Fisher Scientific Chemicals Inc., USA-MA-Ward Hill; Safety Data Sheet for Hexafluorobenzene acc. to OSHA HCS, revision date 07.01.2016.

SDB HFB Sigma; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, DE-89555 Steinheim; Sicherheitsdatenblatt zu Hexafluorbenzol (H8706) gemäß Verordnung (EG) Nr. 453/2010, Version 5.1, überarbeitet am 22.12.2015.

SDB HFB Thermo; Fisher Scientific, USA - Fair Lawn, NJ 07410; Safety Data Sheet for Hexafluorobenzene, revision number 3, revision date 26.01.2018.

SDB OFT Alfa; Alfa Aesar durch Thermo Fisher (Kandel) GmbH, DE-76185 Karlsruhe; Sicherheitsdatenblatt zu Octafluortoluene gemäß 1907/2006/EG überarbeitet am 04.02.2016.

SDB OFT Sigma; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, DE-89555 Steinheim; Sicherheitsdatenblatt zu Octafluortoluol (O2706) gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Version 6.0, überarbeitet am 05.10.2016.

SDB OFT Synquest; SynQuest Laboratories Inc., USA – Alachua, FL 32615; Safety Data Sheet ID 1800201 for Octafluorotoluene acc. To Federal Register / Vol. 77, No. 58 / Monday, March 26, 2012 / Rules and Regulations., Version 1.0, date of issue 11.11.2016.

SDB PFD F2; F2 Chemicals Ltd., UK-PR4 ORZ Preston; Safety Data Sheet for Perfluorodecalin, Version 4.0, date of issue 02.01.2018.

SDB PFD Sigma; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, DE-89555 Steinheim; Sicherheitsdatenblatt zu Perfluorodecalin (P9900) gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Version 5.3, überarbeitet am 18.07.2014.

SDB PFD Thermo; Thermo Fisher (Kandel) GmbH, DE-76185 Karlsruhe; Sicherheitsdatenblatt zu Perfluoro(decahydronaphthalene), cis + trans acc. to 1907/2006/EC Art. 31, Version 2, revision date 10.04.2017.

SDB PFN Alfa; Alfa Aesar durch Thermo Fisher (Kandel) GmbH, DE-76185 Karlsruhe; Sicherheitsdatenblatt zu Octafluornaphthalene gemäß 1907/2006/EG Art. 31 überarbeitet am 16.10.2008.

SDB PFN Sigma; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, DE-89555 Steinheim; Sicherheitsdatenblatt zu Octafluornaphthalin (248061) gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Version 5.1, überarbeitet am 04.07.2013.

SDB PFN Synquest; SynQuest Laboratories Inc., USA – Alachua, FL 32615; Safety Data Sheet ID 1600202 for Octafluoronaphthalene acc. To Federal Register / Vol. 77, No. 58 / Monday, March 26, 2012 / Rules and Regulations., Version 1.0, date of issue 21.07.2016.

SDB SF6 Airliquide; AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, D-40235 Düsseldorf, Sicherheitsdatenblatt Nr. 110 zu Schwefelhexafluorid gemäß RL 1907/2006/EG, Version 3-01 vom 23.07.2014.

SDB SF6 PanGas; PanGas AG, CH-6252 Dagmersellen, Sicherheitsdatenblatt Nr. 000010021723 zu Schwefelhexafluorid, Version 2.0 vom 06.02.2017.

Smith, A. G.; Francis, J. E. (1980): Relative abilities on a molar basis of hexafluorobenzene, hexachlorobenzene and hexabromobenzene to decrease liver uroporphyrinogen decarboxylase activity and cause porphyria in female rats. In: Res. Commun. Chem. Pathol. Pharmacol. Vol. 28 (2), S. 377-384.

ToxLine PFN; Suche in ToxLine nach CAS-Nummer 313-72-4, https://toxnet.nlm.nih.gov/newtoxnet/toxline.htm abgerufen am 01.07.2018.

UBA Rigoletto; UBA Datenbank Wassergefährdungsklassen, http://webrigoletto.uba.de/rigoletto, Gesamtliste WGK abgerufen am 03.06.2018.

US MEG 2013; US Army Public Health Command Technical Guide 2013, Revision 2013, Environmental Health Risk Assessment and Chemical Exposure Guidelines for Deployed Military Personnel.

US PEL; 29 CFR 1910.1000 Subpart Z, OSHA Annotated Table Z-1, https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html, abgerufen am 13.06.2018.

Walker, G. M.; Kasem, K. F.; O'Toole, S. J.; Watt, A.; Skeoch, C. H.; Davis, C. F. (2003): Early Perfluorodecalin Lung Distension in Infants With Congenital Diaphragmatic Hernia. In: Journal of Pediatric Surgery 38 (1), S. 17-20. DOI: 10.1053/jpsu.2003.50002.

Wemhöner, Andreas; Hackspiel, Irmgard; Hobi, Nina; Ravasio, Andrea; Haller, Thomas; Rüdiger, Mario (2010): Effects of Perfluorocarbons on surfactant exocytosis and membrane properties in isolated alveolar type II cells. In: Respiratory Research 11 (1), S. 52. DOI: 10.1186/1465-9921-11-52.

8 Quellenverzeichnis Luftwechselraten

Almeida, Ricardo M.S.F.; Barreira, Eva; Moreira, Pedro (2017): Assessing the variability of the air change rate through tracer gas measurements. In: Energy Procedia 132, S. 831–836. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.013.

Andersen, Claus E.; Bergsoe, Niels C.; Majborn, Benny; Ulbak, Kaare (1997): Radon and Natural Ventilation in Newer Danish Single-Family Houses. In: Indoor air 7 (4), S. 278–286. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1997.00007.x.

ASTM D6245-98, ASTM Standard Stand 1998: Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation.

ASTM E741 – 00 (Reapproved 2006)$^{\epsilon}$, ASTM Standard Stand 2009: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.

Batterman, Stuart (2017): Review and Extension of CO_2-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. In: International Journal of Environmental Research and Public Health 14 (2), S. 145. DOI: 10.3390/ijerph14020145.

Bekö, Gabriel; Lund, Toste; Nors, Fredrik; Toftum, Jorn; Clausen, Geo (2010): Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children. In: Building and Environment 45 (10), S. 2289–2295. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.04.014.

Bekö, Gabriel; Gustavsen, Sine; Frederiksen, Marie; Kolařík, Barbara; Toftum, Jorn; Clausen, Geo (2011): Comparison of air change rates obtained by different ventilation measurement techniques in five Danish homes. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air 2011. Proceedings of the 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011; Indoor Air 2011. Austin, Texas, USA, 5 - 10 June 2011. International Society of Indoor Air Quality and Climate. Red Hook, NY: Curran, S. 602.

Bekö, Gabriel; Gustavsen, Sine; Frederiksen, Marie; Bergsoe, Niels C.; Kolařík, Barbara; Gunnarsen, Lars et al. (2016): Diurnal and seasonal variation in air exchange rates and interzonal airflows measured by active and passive tracer gas in homes. In: Building and Environment 104, S. 178–187. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.05.016.

Bennett, Deborah; Apte, Michael; Wu, Xiangmei (May); Trout, Amber; Faulkner, David; Maddalena, Randy; Sullivan, Doug (2011): Indoor Environmental Quality and Heating, Ventilating, and Air Conditioning Survey of Small and Medium Size Commercial Buildings: Field Study. California Energy Commission CEC-500-2011-043. University of California Davis.

Bjorling, Mikael; Stymne, Hans; Mattsson, Magnus; Blomqvist, Claes (2007): Ventilation Measurements Combined with Pollutant Concentration Measurements Discriminates Between High Emission Rates and Insufficient Ventilation. In: International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings (Hg.): IAQVEC 2007, Bd. 2. 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment. Sendai, Japan, 28-31 October 2007, S. 393–400.

Bornehag, C. G.; Sundell, Jan; Hagerhed-Engman, L.; Sigsgaard, T. (2005): Association between ventilation rates in 390 Swedish homes and allergic symptoms in children. In: Indoor air 15 (4), S. 275–280. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2005.00372.x.

Carrilho, João Dias; Mateus, Mário; Batterman, Stuart; da Silva, Manuel Gameiro (2015): Air exchange rates from atmospheric CO2 daily cycle. In: Energy and Buildings 92, S. 188–194. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.01.062.

Chao, Jiangyue; Mu, Xuan; Xue, Yu; Li, Fei; Li, Weijuan; Lin, Chao-Hsin et al. (2014): A modified tracer-gas decay model for ventilation rate measurements in long and narrow spaces. In: Indoor and Built Environment 23 (7), S. 1012–1020. DOI: 10.1177/1420326X13487743.

Chao, Christopher Y. H.; Tung, Thomas C. W.; Burnett, John (1997): Influence of ventilation on indoor radon level. In: Building and Environment 32 (6), S. 527–534. DOI: 10.1016/S0360-1323(97)00017-6.

Chao, Christopher Y. H.; Wan, M. P.; Law, A. K. (2004): Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy. In: Building and Environment 39 (11), S. 1277–1288. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.03.012.

Charlesworth, Peter S. (1988): Air exchange rate and airtightness measurement techniques : an applications guide. AIVC measurement techniques guide. Document AIC-AG-2-88. Coventry, UK: Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC Technical Guide, 2). Online verfügbar unter http://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Guides/GUAG%20MEASUREMENT%20TECHNIQUES.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2018.

Cheong, K. W.; Riffat, S. B. (1995): New approach for measuring airflows in buildings using a perfluorocarbon tracer. In: Applied Energy 51 (3), S. 223–232. DOI: 10.1016/0306-2619(95)00001-9.

Chuah, Y. K.; Fu Y. M.; Hung, C. C.; Tseng, P. C. (1997): Concentration variations of pollutants in a work week period of an office. In: Building and Environment 32 (6), S. 535–540. DOI: 10.1016/S0360-1323(97)00018-8.

Chung, Kee-Chiang; Hsu, Shou-Ping (2001): Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution. In: Building and Environment 36 (9), S. 989–998. DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00051-2.

Cui, Shuqing; Cohen, Michaël; Stabat, Pascal; Marchio, Dominique (2015): CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. In: Building and Environment 84, S. 162–169. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.007.

De Gids, W. (2003): Ventilation in dutch houses, a study in a representative sample of the dutch housing stock. In: Air Infiltration and Ventilation Centre / BETEC (Hg.): Proceedings 24th AIVC and BETEC Conference. 24th AIVC and BETEC Conference - Ventilation, Humidity control and energy. Washington D.C., USA, 12- 14 October 2003. Air Infiltration and Ventilation Centre / BETEC.

Dietz, R. N.; Cote, E. A. (1982): Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique. In: Environment International 8 (1-6), S. 419–433. DOI: 10.1016/0160-4120(82)90060-5.

DIN EN ISO 12569:2018-04, DIN-Norm April 2018: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren (ISO 12569:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12569:2017.

DIN EN ISO 16000-9:2006-06, DIN-Norm Juni 2006: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen- Emissionsprüfkammer Verfahren (ISO 16000-9:2006); Deutsche Fassung EN ISO 16000-9:2006.

DIN ISO 16000-8:2008-01, DIN-Norm Januar 2008: Innenraumluftverunreinigungen — Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen (ISO 16000-8:2007).

Dols, W. Stuart; Persily, Andrew (1995): A Study of Ventilation Measurement in an Office Building. In: Mark P. Modera und Andrew Persily (Hg.): Airflow Performance of Building Envelopes, Components and Systems, ASTM Special Technical Publication 1255. Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials, S. 23–46. DOI: 10.1520/STP1255-EB.

Du, Liuliu; Batterman, Stuart; Godwin, Christopher; Chin, Jo-Yu; Parker, Edith; Breen, Michael; Brakefield, Wilma; Robins, Thomas; Lewis, Toby (2012): Air change rates and interzonal flows in residences, and the need for multi-zone models for exposure and health analyses. In: International Journal of Environmental Research and Public Health 9 (12), S. 4639–4661. DOI: 10.3390/ijerph9124639.

Edouard, Nadège; Mosquera, Julio; van Dooren, Hendrik J.C.; Mendes, Luciano B.; Ogink, Nico W.M. (2016): Comparison of CO2- and SF6- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn. In: Biosystems Engineering 149, S. 11–23. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001.

Frederiksen, Marie; Bergsoe, Niels C.; Kolařík, Barbara; Spilak, Michal; Bekö, Gabriel; Gustavsen, Sine et al. (2011): Seasonal Variation in Monthly Average Air Change Rates Using Passive Tracer Gas Measurements. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air 2011. Proceedings of the 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011; Indoor Air 2011. Austin, Texas, USA, 5 - 10 June 2011. International Society of Indoor Air Quality and Climate. Red Hook, NY: Curran, S. 317. Online verfügbar unter https://www.isiaq.org/docs/presentations/0317_Frederiksen.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Grimsrud, David T.; Sherman, Max H.; Janssen, John E.; Pearman, A. Noel; Harrje, David T. (1980): AN INTERCOMPARISON OF TRACER GASES USED FOR AIR INFILTRATION MEASUREMENTS. No. 2572. In: American Society of Heating, Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers, Inc. (Hg.): ASHRAE Transactions, 86 Part 1A. ASHRAE Winter Conference. Los Angeles, CA, USA (86 Part 1), S. 258–267. Online verfügbar unter https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/an_intercomparison_of_tracer_gases_used_for_air_infiltration_measurements.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Gustavsen, Sine; Bekö, Gabriel; Toftum, Jorn; Clausen, Geo (2011): Field measurements of seasonal variation in air change rate and spatial distribution of gaseous pollutants in five Danish homes. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air 2011. Proceedings of the 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011; Indoor Air 2011. Austin, Texas, USA, 5 - 10 June 2011. International Society of Indoor Air

Quality and Climate. Red Hook, NY: Curran, S. 608. Online verfügbar unter https://www.isiaq.org/docs/presentations/0608_Gustavsen.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Hirsch, T.; Hering, M.; Bürkner, K.; Hirsch, D.; Leupold, W.; Kerkmann, M.-L. et al. (2000): House-dust-mite allergen concentrations (Der f 1) and mold spores in apartment bedrooms before and after installation of insulated windows and central heating systems. In: Allergy 55 (1), S. 79–83. DOI: 10.1034/j.1398-9995.2000.00250.x.

Hou, Jing; Sun, Yuexia; Kong, Xiangrui; Wang, Pan; Zhang, Qingnan; Sundell, Jan (2015): Single and Multiple Zone Methods to Calculate Air Change Rate in Apartments. In: Procedia Engineering 121, S. 567–572. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.1035.

Hou, Jing; Zhang, Yufeng; Sun, Yuexia; Wang, Pan; Zhang, Qingnan; Kong, Xiangrui; Sundell, Jan (2017): Air Change Rates in Residential Buildings in Tianjin, China. In: Procedia Engineering 205, S. 2254–2258. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.069.

Howard-Reed, Cynthia; Wallace, Lance A.; Ott, Wayne R. (2002): The Effect of Opening Windows on Air Change Rates in Two Homes. In: Journal of the Air & Waste Management Association 52 (2), S. 147–159. DOI: 10.1080/10473289.2002.10470775.

Iizuka, Atsushi; Okuizumi, Yumiko; Yanagisawa, Yukio (2010): Estimation of Uncertainty in Tracer Gas Measurement of Air Change Rates. In: International Journal of Environmental Research and Public Health 7 (12), S. 4238–4249. DOI: 10.3390/ijerph7124238.

JISA 1406; Japan Industrial Standard Dezember 1974: Methode for measuring amount of room ventilation (carbon dioxide method). Auf Japanisch.

Krooß, J.; Siemers, U.; Stolz, P.; Weis, N.; Clausnitzer, K.-D. (1997): Luftwechselraten in Wohn- und Arbeitsräumen. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 57, S. 357–362.

Kumar, T.; Ireson, A. D.; Orr, H. W. (1979): An automated air infiltration measuring system using SF6 tracer gas in constant concentration and decay methods. No. 2553. In: American Society of Heating, Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers, Inc. (Hg.): ASHRAE Transactions, 85 Part 2A. ASHRAE Annual Meeting. Detroit, MI, USA (85 Part 2), S. 385–395. Online verfügbar unter https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=4e8dd9df-0d59-4eb4-ae8d-7f8db008c1b8, zuletzt geprüft am 16.04.2018.

Labat, Matthieu; Woloszyn, Monika; Garnier, Géraldine; Roux, Jean Jacques (2013): Assessment of the air change rate of airtight buildings under natural conditions using the tracer gas technique. Comparison with numerical modelling. In: Building and Environment 60, S. 37–44. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.010.

Lagus, Peter L. (13.05.2006): Control Room Inleakage Measurements using Tracer Gas Techniques. Presented at Vent2006. Chicago, Illinois.

Laporthe, Stéphanie; Virgone, Joseph; Castanet, Sophie (2001): A comparative study of two tracer gases: SF6 and N2O. In: Building and Environment 36 (3), S. 313–320. DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00005-6.

Laussmann, Detlef; Helm, Dieter (2011): Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality. Kapitel 14. In: Nicolas Mazzeo (Hg.): Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality. Rijeka, Croatia: InTech, S. 365–406. DOI: 10.5772/18600.

Leivo, Virpi; Prasauskas, Tadas; Du, Liuliu; Turunen, Mari; Kiviste, Mihkel; Aaltonen, Anu et al. (2018): Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. In: Science of The Total Environment 621, S. 398–406. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.227.

Lembrechts, Johan; Janssen, Martien; Stoop, Paul (2001): Ventilation and radon transport in Dutch dwellings: computer modelling and field measurements. In: Science of The Total Environment 272 (1-3), S. 73–78. DOI: 10.1016/S0048-9697(01)00667-2.

Llamas, Martin (2002): Auswahl geeigneter Adsorbentien zum Nachweis von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Innenraumluft und in Prüfkammern. Diplomarbeit. Fachhochschule Bingen, Bingen.

Lunden, Melissa M.; Faulkner, David; Heredia, Elizabeth; Cohn, Sebastian; Dickerhoff, Darryl; Noris, Federico et al. (2012): Experiments to Evaluate and Implement Passive Tracer Gas Methods to Measure Ventilation Rates in Homes. LBNL Paper LBNL-5984E. Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. Online verfügbar unter http://escholarship.org/uc/item/46b5m5nh, zuletzt geprüft am 20.04.2018.

Mahyuddin, Norhayati; Awbi, Hazim B. (2012): A Review of CO2 Measurement Procedures in Ventilation Research. In: International Journal of Ventilation 10 (4), S. 353–370. DOI: 10.1080/14733315.2012.11683961.

Mailahn, W.; Seifert, B.; Ullrich, D. (1987): The use of a passive sampler for the simultaneous determination of long-term ventilation rates and VOC concentrations. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air `87. Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Bd. 1. Unter Mitarbeit von B. Seifert, H. Esdorn, M. Fischer, H. Rüden und J. Wegner. 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 1987; Indoor Air `87. Berlin (West), Germany, 17 - 21 August 1987. Institute for Soil, Water, and Air Hygiene, S. 149–153.

Markov, Detelin G.; Melikov, Arsen K. (2014): Novel approach for evaluation of air change rate in naturally ventilated occupied spaces based on metabolic CO2 time variation. Topic B6, Paper HP0883. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air 2014. Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Unter Mitarbeit von Yuguo Li und Xinyan Yang. 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2014; Indoor Air 2014. Hongkong, China, 7 - 12 July 2014. International Society of Indoor Air Quality and Climate. Red Hook, NY: Curran. Online verfügbar unter https://www.isiaq.org/docs/paper/HP0883.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2018.

McDowall, Peter D.; Plagmann, Manfred (2014): Estimating the impact of incomplete tracer gas mixing on infiltration rate measurements. In: Air Infiltration and Ventilation Centre (Hg.): Proceedings 35th AIVC - 4th TightVent - 2nd venticool Conference, "Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance". Poznan, Poland, 24 - 25 September 2014. Air Infiltration and Ventilation Centre. Online verfügbar unter https://www.aivc.org/sites/default/files/68.pdf, zuletzt geprüft am 22.04.2018.

McNeil, S.; Quaglia, L.; Bassett, M.; Overton, G.; Plagmann, Manfred (2012): A survey of airtightness and ventilation rates in post 1994 NZ homes. In: Air Infiltration and Ventilation Centre (Hg.): Proceedings 33rd AIVC and 2nd TightVent Conference - Optimising Ventilative Cooling and Airtightness for [Nearly] Zero-Energy Buildings, IAQ and Comfort. Copenhagen, Denmark, 10 - 11 October 2012. Air Infiltration and Ventilation Centre. Online verfügbar unter https://www.aivc.org/sites/default/files/25%20AIVC_TightVent_Conference_Papers_2012.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2018.

Miller, S. L.; Leiserson, K.; Nazaroff, W. W. (1997): Nonlinear Least-Squares Minimization Applied to Tracer Gas Decay for Determining Airflow Rates in a Two-Zone Building. In: Indoor air 7 (1), S. 64–75. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00008.x.

Nabinger, Steven; Persily, Andrew; Dols, W. Stuart (1994): A Study of Ventilation and Carbon Dioxide in an Office Building. OR-94-22; No. 1264. In: American Society of Heating, Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers, Inc. (Hg.): ASHRAE Transactions, 100 Part 2B. ASHRAE Annual Conference. Orlando, FL, USA (100 Part 2).

Nabinger, Steven; Persily, Andrew (2011): Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home. In: Energy and Buildings 43, S. 3059–3067. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.07.027.

Niemelä, R.; Lefevre, A.; Muller, J. P.; Aubertin, G. (1991): COMPARISON OF THREE TRACER GASES FOR DETERMINING VENTILATION EFFECTIVENESS AND CAPTURE EFFICIENCY. In: The Annals of Occupational Hygiene 35 (4), S. 405–417. DOI: 10.1093/annhyg/35.4.405.

NT VVS 019:1988-09, Nordtest Methode Ed. 2 September 1988: Buildings - Ventilation Air: Local Mean Age. ISSN 0283-7226.

NT VVS 047:1985-11, Nordtest Methode November 1985: Buildings - Ventilating Air: Mean Age of Air. ISSN 0283-7726.

NT VVS 048:1986-02, Nordtest Methode Februar 1986: Buildings: Total Flow Rate of Air - Continuous Measurement. ISSN 0283-7226.

NT VVS 055:1987-06, Nordtest Methode Juni 1987: Buildings: Total Outdoor Air Inflow. ISSN 0283-7226.

NT VVS 074:1989-05, Nordtest Methode Mai 1989: Total Ventilation Air Flow Rate: Continous Measurement - Constant Flow Technique". ISSN 0283-7226.

NT VVS 105:1994-11, Nordtest Methode November 1994: Ventilation: Flow Rate, Total Effective - By Single Zone Approximation". ISSN 0283-7226.

NT VVS 114:1997-05, Nordtest Methode Mai 1997: Indoor Air Quality: Measurement of CO_2. ISSN 0283-7226.

NT VVS 118:1997-11, Nordtest Methode November 1997: Ventilation: Local Mean Age of Air -Homogeneous Emission Techniques. ISSN 0283-7226.

Offermann, Francis J. (2009): Ventilation and Indoor Air Quality in New Homes. PIER Collaborative Report CEC-500-2009-05. Hg. v. California Air Resources Board & California Energy Commission, PIER Energy-Related Research Program. Indoor Environmental

Engineering, San Francisco, CA. Online verfügbar unter https://www.arb.ca.gov/research/apr/past/04-310.pdf, zuletzt geprüft am 24.04.18.

Ohlsson, K. E. Anders; Yang, Bin; Ekblad, Alf; Boman, Christoffer; Nyström, Robin; Olofsson, Thomas (2017): Stable carbon isotope labelled carbon dioxide as tracer gas for air change rate measurement in a ventilated single zone. In: Building and Environment 115, S. 173–181. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.021.

Øie, Leif; Stymne, Hans; Boman, Carl-Axel; Hellstrand, Vidar (1998): The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences. In: Indoor air 8, S. 190–196.

Okuyama, Hiroyasu; Onishi, Yoshinori (2012): Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate. In: Building and Environment 49, S. 182–192. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.09.018.

Pandian, Muhilan D.; Behar, Joseph V.; Ott, Wayne R.; Wallace, Lance A.; Wilson, A. L.; Colome, Steven D.; Koontz, Michael (1998): Correcting Errors in the Nationwide Data Base of Residential Air Exchange Rates. In: Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 8 (4), S. 577–585.

Parker, G. B. (1986): Measured Air Exchange Rates and Indoor Air Quality in Multifamily Residences. In: Energy and Buildings 9 (4), S. 293–303. DOI: 10.1016/0378-7788(86)90034-4.

Penman, J. M. (1980): An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide concentration. In: Building and Environment 15 (1), S. 45–47. DOI: 10.1016/0360-1323(80)90028-1.

Penman, J. M.; Rashid, A. A. M. (1982): Experimental determination of air-flow in a naturally ventilated room using metabolic carbon dioxide. In: Building and Environment 17 (4), S. 253–256. DOI: 10.1016/0360-1323(82)90017-8.

Persily, Andrew (1997): Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. No. 4072. In: American Society of Heating, Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers, Inc. (Hg.): ASHRAE Transactions, 103 Part 2. ASHRAE Annual Conference. Boston, MA, USA (103 Part 2).

Persily, Andrew; Gorfain, J.; Brunner, G. (2005): Ventilation Rates in U.S. Office Buildings from the EPA BASE Study. In: International Society of Indoor Air Quality and Climate (Hg.): Indoor Air 2005. Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Bd. 10. Unter Mitarbeit von Xudong Yang, Bin Zhao und Rongyi Zhao. 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2005; Indoor Air 2005. Beijing, China, 4-9 September 2005. International Society of Indoor Air Quality and Climate, S. 917–921. Online verfügbar unter https://www.isiaq.org/docs/PDFs/0917.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2018.

Persily, Andrew (2016): Field measurement of ventilation rates. Keynote: Indoor Air 2014. In: Indoor air 26 (1), S. 97–111. DOI: 10.1111/ina.12193.

Qi, Meiwei; Li, Haoru; Li, Xiaofeng (2013): Field Testing Of Natural Ventilation In Typical College Student Dormitories In Beijing. In: International Building Performance Simulation Associatio (Hg.): Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Bd. 13. Unter Mitarbeit von Etienne Wurtz. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association (BS2013). Chambery, France, 25-28 August 2013 (Building Simulation Conference Papers, 13), S. 520–527. Online verfügbar unter http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1190.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2018.

Raatschen, Willigert (2002): Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. Luftaustausch - Messung und Simulation. Überarbeitete Fassung des Sonderdrucks aus gi - Gesundheitsingenieur 116 (1995) Nr. 2 S.78-87 und Nr. 3 S. 129-138. Hg. v. TracerTech Gesellschaft für Spurengastechnik mbH. Immenstaad, Deutschland. Online verfügbar unter http://www.tracertech.de/wp-content/uploads/2015/12/TGmess.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2018.

Roulet, C.-A.; Foradini, F. (2002): Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO2 Concentration Decays. In: International Journal of Ventilation 1 (1), S. 39–44. DOI: 10.1080/14733315.2002.11683620.

Salthammer, Tunga (1994): Luftverunreinigende organische Substanzen in Innenräumen. In: Chemie in unserer Zeit 28 (6), S. 280–290. DOI: 10.1002/ciuz.19940280603.

Sekhar, S. C. (2004): Enhancement of ventilation performance of a residential split-system air-conditioning unit. In: Energy and Buildings 36 (3), S. 273–279. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.12.004.

Shaw, C. Y. (1984): The Effect of Tracer Gas on the Accuracy of Air-Change Measurements in Buildings. No. 2816. In: American Society of Heating, Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers, Inc. (Hg.): ASHRAE Transactions, 90 Part 1A. ASHRAE Winter Conference. Atlanta, GA, USA (90 Part 1), S. 212–225. Online verfügbar unter https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=6d448233-cbfe-44ae-988e-40b522523532, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Sherman, Max H.; Grimsrud, David T.; Condon, Paul E.; Smith, Brian V. (1980): Air Infiltration Measurement Techniques. LBNL Report LBL-10705. In: Air Infiltration and Ventilation Centre (Hg.): Proceedings 1st AIC Conference - Air infiltration instrumentation and measuring techniques. Windsor, UK, 6-8 October 1980. Air Infiltration and Ventilation Centre. Windsor, UK. Online verfügbar unter https://escholarship.org/uc/item/8qx8385w#main, zuletzt geprüft am 28.04.2018.

Sherman, Max H. (1989): Air Infiltration Measurement Techniques. LBL-27656 version as of November 19, 1998, Revision of LBL-10705 (Sherman et al., 1980). In: Air Infiltration and Ventilation Centre (Hg.): Proceedings 10th AIVC Conference - Progress and trends in air infiltration and ventilation research. Espoo, Finnland, 25-28 September 1989. Air Infiltration and Ventilation Centre. Espoo, Finnland.

Sherman, Max H. (1990): Tracer-Gas Techniques For Measuring Ventilation in a Single Zone. In: Building and Environment 25 (4), S. 365–374. DOI: 10.1016/0360-1323(90)90010-O.

Sherman, Max H.; Walker, Iain S.; Lunden, Melissa M. (2014): Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods. In: International Journal of Ventilation 13 (1), S. 13–28. DOI: 10.1080/14733315.2014.11684034.

Shinohara, Naohide; Kataoka, Toshiyuki; Takamine, Koichi; Butsugan, Michio; Nishijima, Hirokazu; Gamo, Masashi (2010): Modified perfluorocarbon tracer method for measuring effective multizone air exchange rates. In: International Journal of Environmental Research and Public Health 7 (9), S. 3348–3358. DOI: 10.3390/ijerph7093348.

Smith, P. N. (1988): Determination of Ventilation Rates in Occupied Buildings from Metabolic CO2 Concentrations and Production Rates. In: Building and Environment 23 (2), S. 95–102. DOI: 10.1016/0360-1323(88)90023-6.

Stymne, Hans; Boman, Carl-Axel; Kronvall, Johnny (1994): Measuring ventilation rates in the Swedish housing stock. In: Building and Environment 29 (3), S. 373–379. DOI: 10.1016/0360-1323(94)90037-X.

Sundell, Jan; Levin, Hal; Novosel, Davor (2006): VENTILATION RATES AND HEALTH: REPORT OF AN INTERDISCIPLINARY REVIEW OF THE SCIENTIFIC LITERATURE. FINAL REPORT NCEMBT 070914. Hg. v. NATIONAL CENTER FOR ENERGY MANAGEMENT AND BUILDING TECHNOLOGIES TASK 06-01. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/242753340_Ventilation_Rates_and_Health_Report_of_an_Interdisciplinary_Review_of_the_Scientific_Literature, zuletzt geprüft am 24.04.18.

Teijonsalo, Jussi; Jaakkola, Jouni J. K.; Seppänen, Olli (1996): The Helsinki Office Environment Study: Air Change in Mechanically Ventilated Buildings. In: Indoor air 6 (2), S. 111–117. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1996.t01-2-00007.x.

van Buggenhout, S.; van Brecht, A.; Özcan, S. E.; Vranken, E.; van Malcot, W.; Berckmans, D. (2009): Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. In: Biosystems Engineering 104 (2), S. 216–223. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.04.018.

van Ryswyk, K.; Wallace, Lance A.; Fugler, D.; MacNeill, M.; Héroux, M. È.; Gibson, M. D. et al. (2015): Estimation of bias with the single-zone assumption in measurement of residential air exchange using the perfluorocarbon tracer gas method. In: Indoor air 25 (6), S. 610–619. DOI: 10.1111/ina.12171.

VDI 4300 Blatt 7; VDI-Richtlinie 4300 Blatt 7, Juli 2001: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. In: VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN-Normenausschuss, Arbeitsgruppe Bestimmung der Luftwechselzahl, Ausschuss Immissionsmessverfahren.

Walker, Iain S.; Forest, T. W. (1995): Field Measurements of Ventilation Rates in Attics. In: Building and Environment 30 (3), S. 333–347. DOI: 10.1016/0360-1323(94)00053-U.

Wallace, Lance A.; Emmerich, S. J.; Howard-Reed, Cynthia (2002): Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: the effect of temperature, wind, fans, and windows. In: Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 12 (4), S. 296–306.

Wegner, J. (1982): Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels in ausgeführten Wohnungen, die mit sehr fugendichten Fenstern ausgestattet sind. Abschlußbericht über den Forschungsauftrag. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag (Bau- und Wohnforschung Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, F 1831).

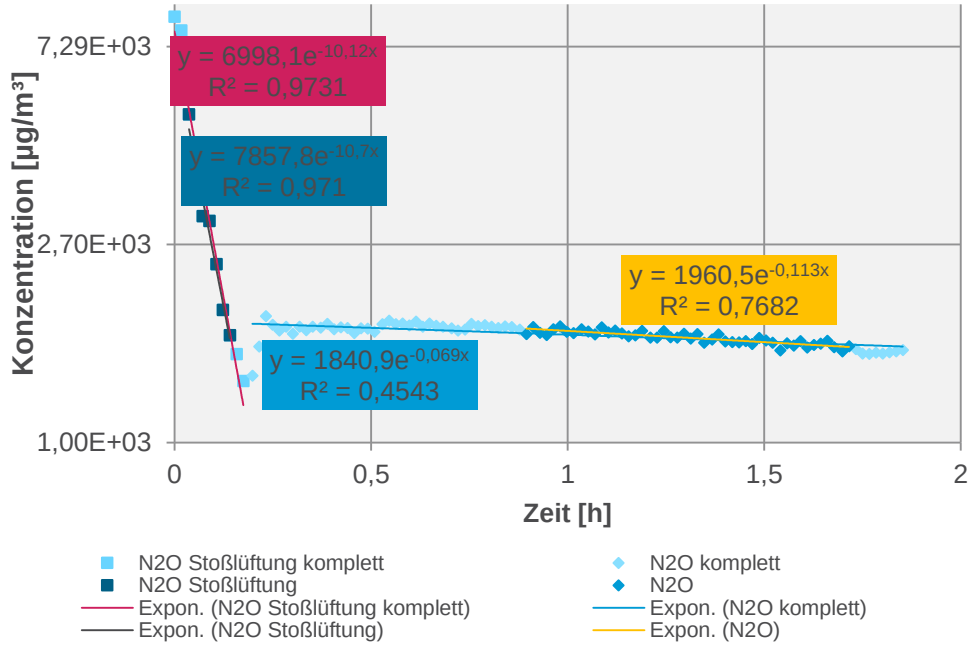
Wegner, J.; Schlüter, G. (1982): Die Bedeutung des Luftwechsels für die Luftqualität von Wohnräumen. The Significance of Air Exchange for Air Quality in Homes. In: K. Aurand, B. Seifert und J. Wegner (Hg.): Luftqualität in Innenräumen. Schriftenreihe Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene Nr. 53, Bd. 53. Stuttgart, New York: Gustav Fischer (Schriftenreihe Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 53), S. 31–40.

Yamamoto, N.; Shendell, D. G.; Winer, A. M.; Zhang, J. (2010): Residential air exchange rates in three major US metropolitan areas: results from the Relationship Among Indoor, Outdoor, and Personal Air Study 1999–2001. In: Indoor air 20 (1), S. 85–90. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2009.00622.x.

9 Anhang zu Abschlussbericht „Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich“

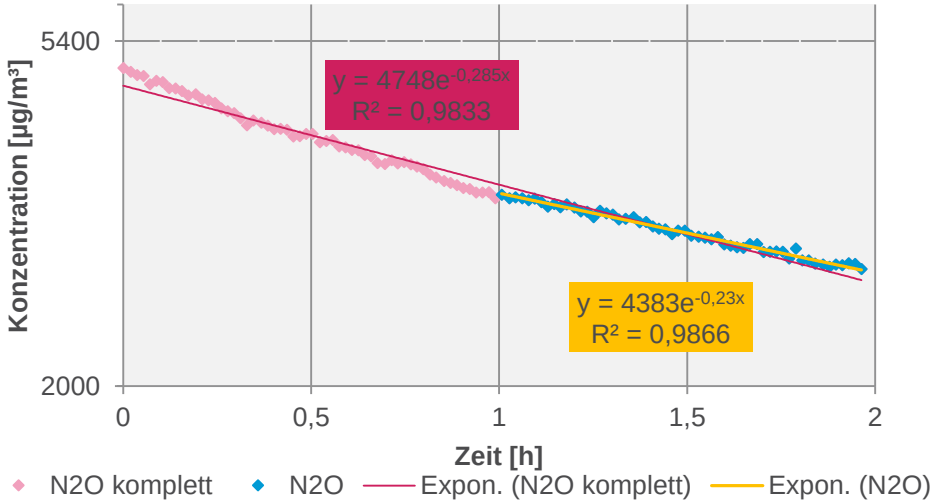
Exemplarische Abklingkurven zu im Text besprochenen Sonderfällen in der Auswertung

Abbildung A1: Exemplarische Abklingkurve im Realraum bei Stoßlüftung am Beispiel N_2O (Proben-Nr. F341-254)



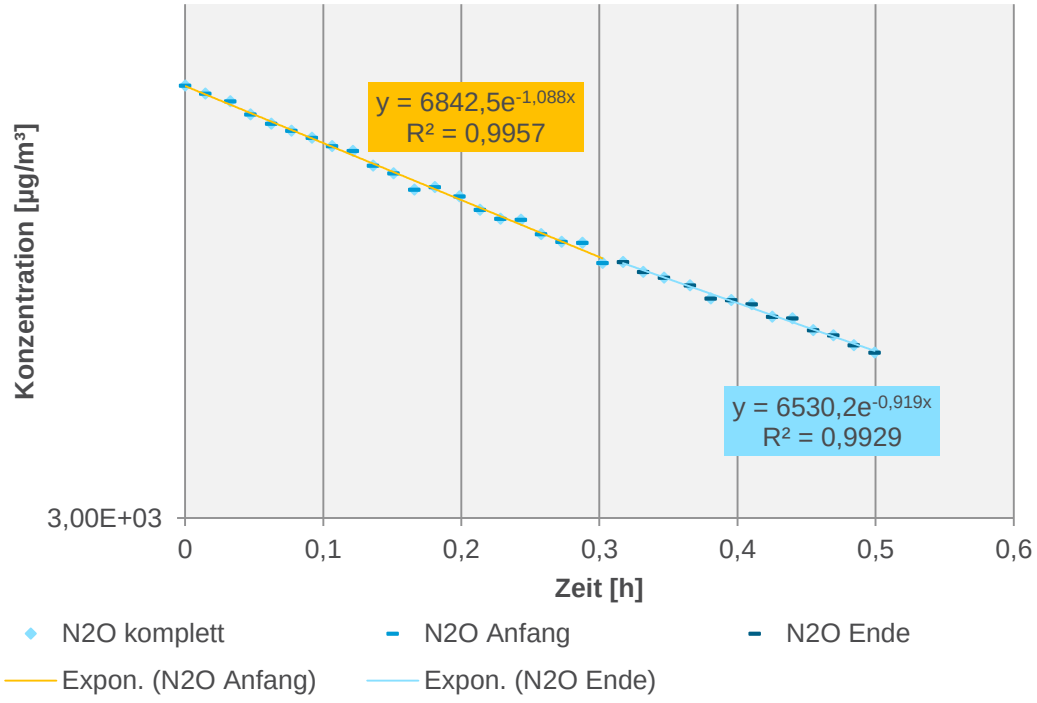
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

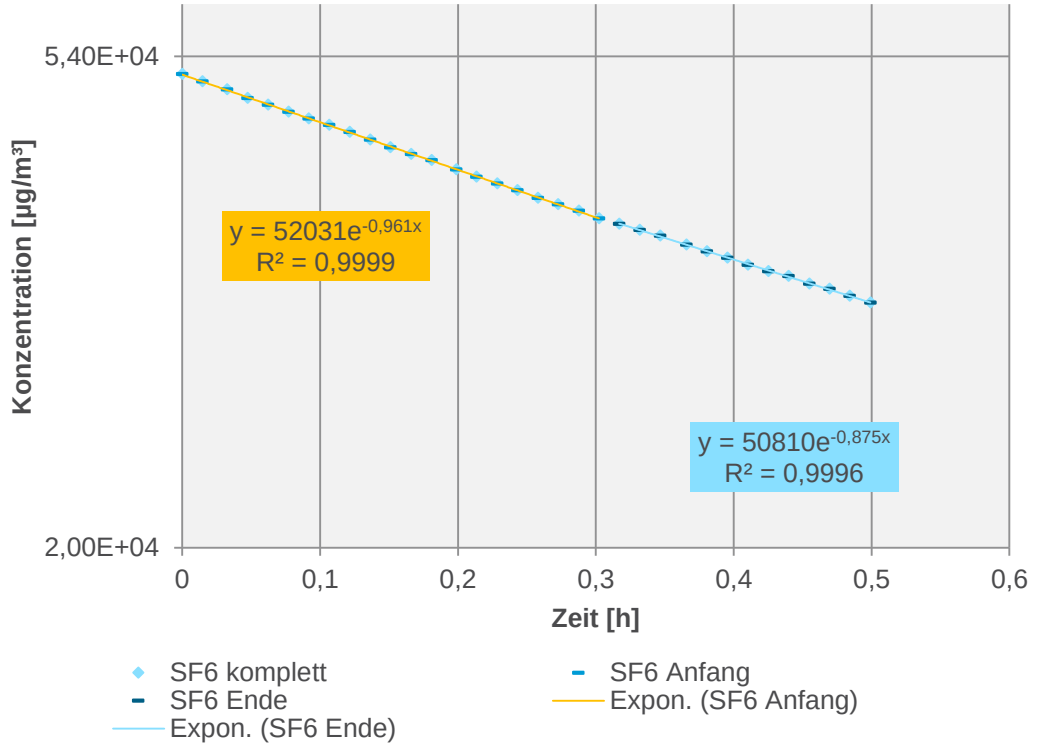
Abbildung A2: Einfluss des ausgewerteten Zeitraums auf das Ergebnis der Abklingmethode bei sehr niedrigen LWR. Beispiel: N_2O im Realraum nach 8 h geschlossenem Fenster (Proben-Nr. F341-3)



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A3: Prüfkammerversuch: Reduktion der LWR von 1 h^{-1} auf 0,9 h^{-1} zum Zeitpunkt 0,25 h. Verlauf der Abklingkurve an den Beispielen N_2O und SF_6





Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Details TD-GC/MS-Methode

Abbildung A4: Parameter der verwendeten TD-GC/MS-Methode

04.10.2017 08:37:08

C:\GCMSsolution\Data\td2\td-Messen.qgm

Method

[Comment]

——-= Analytical Line 1 =-=—

[GC-2010]

Column Oven Temp.	:35.0 °C
Injection Temp.	:25.60 °C
Injection Mode	:Split
Flow Control Mode	:Linear Velocity
Pressure	:229.9 kPa
Total Flow	:67.3 mL/min
Column Flow	:2.47 mL/min
Linear Velocity	:40.0 cm/sec
Purge Flow	:3.0 mL/min
Split Ratio	:25.0
High Pressure Injection	:OFF
Carrier Gas Saver	:OFF
Splitter Hold	:OFF

Oven Temp. Program

Rate	Temperature(°C)	Hold Time(min)
-	35.0	5.00
2.20	110.0	0.00
12.00	225.0	0.00
25.00	300.0	5.00
25.00	320.0	10.00

< Ready Check Heat Unit >

Column Oven	: Yes
TDU	: No
MS	: Yes

< Ready Check Detector(FTD/BID) >
< Ready Check Baseline Drift >
< Ready Check Injection Flow >

TDU Carrier	: Yes
TDU Purge	: Yes

< Ready Check APC Flow >
< Ready Check Detector APC Flow >

External Wait	:No
Equilibrium Time	:0.1 min

[GC Program]

[GCMS-QP2010 Plus]

IonSourceTemp	:200.00 °C
Interface Temp.	:300.00 °C
Solvent Cut Time	:1.50 min
Detector Gain Mode	:Relative to the Tuning Result
Detector Gain	:+0.50 kV
Threshold	:0

[MS Table]

--Group 1 - Event 1--

Start Time	:1.80min
End Time	:55.00min
ACQ Mode	:Scan
Event Time	:0.20sec
Scan Speed	:1666
Start m/z	:37.00
End m/z	:350.00

Sample Inlet Unit :GC

[MS Program]

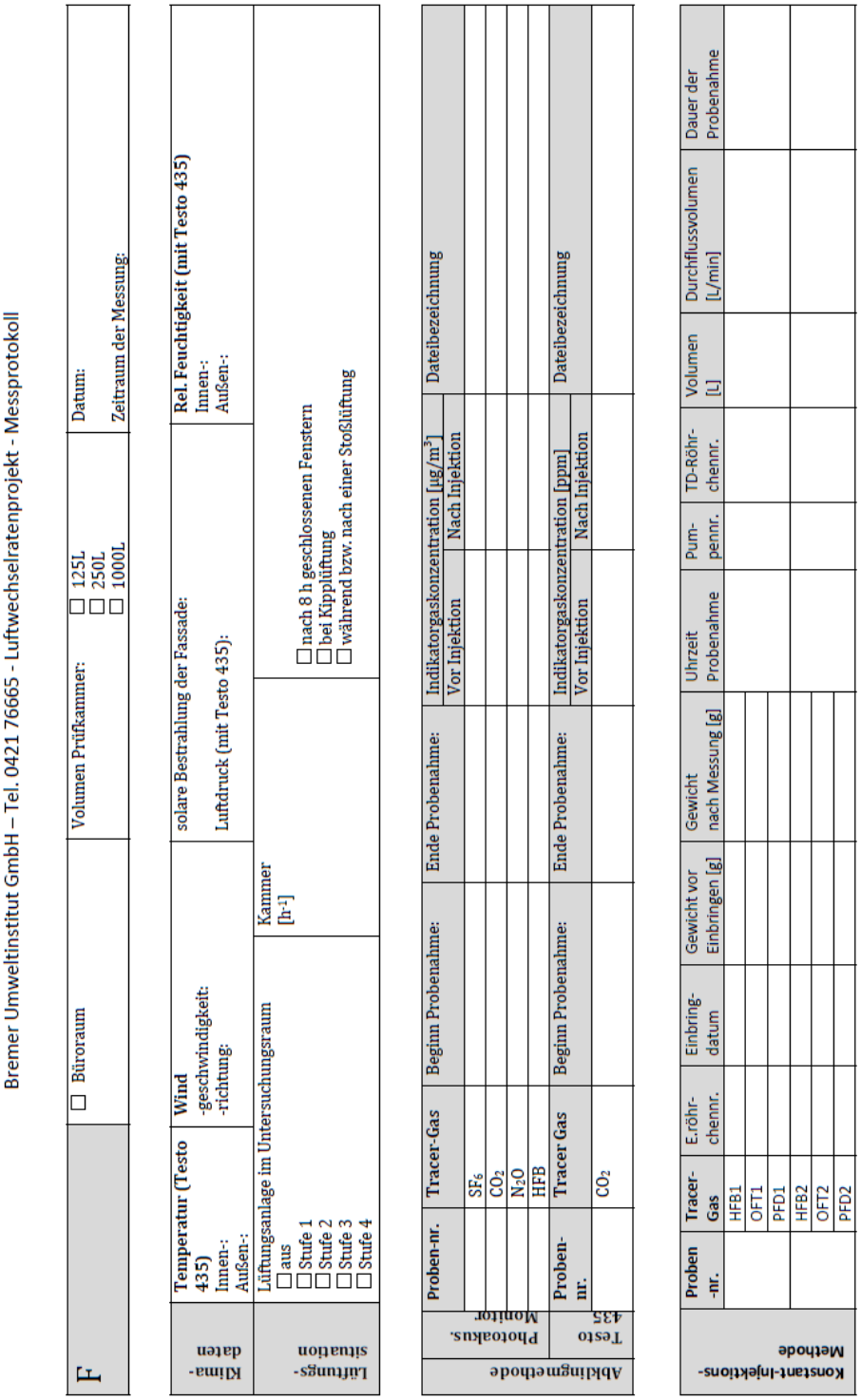
Use MS Program :OFF

1 / 1

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Messprotokoll

Abbildung A5: Vorlage Messprotokoll



Bremer Umweltinstitut GmbH – Tel. 0421 76665 - Luftwechselratenprojekt - Messprotokoll

F	☐ Büroraum	Volumen Prüfkammer:	☐ 125L ☐ 250L ☐ 1000L	Datum: Zeitraum der Messung:

Klima-daten	**Temperatur (Testo 435)** Innen-: Außen-:	**Wind** -geschwindigkeit: -richtung:	solare Bestrahlung der Fassade: Luftdruck (mit Testo 435):	**Rel. Feuchtigkeit (mit Testo 435)** Innen-: Außen-:
Lüftungs-situation	Lüftungsanlage im Untersuchungsraum ☐ aus ☐ Stufe 1 ☐ Stufe 2 ☐ Stufe 3 ☐ Stufe 4	Kammer [h^{-1}]	☐ nach 8 h geschlossenen Fenstern ☐ bei Kipplüftung ☐ während bzw. nach einer Stoßlüftung	

Abklingmethode	Proben-nr.	Tracer-Gas	Beginn Probenahme:	Ende Probenahme:	Indikatorgaskonzentration [µg/m³]		Dateibezeichnung
					Vor Injektion	Nach Injektion	
Photoakus. Monitor		SF_6					
		CO_2					
		N_2O					
		HFB					
Testo 435	**Proben-nr.**	**Tracer Gas**	**Beginn Probenahme:**	**Ende Probenahme:**	**Indikatorgaskonzentration [ppm]**		**Dateibezeichnung**
					Vor Injektion	**Nach Injektion**	
		CO_2					

Konstant-Injektions-Methode	**Proben-nr.**	**Tracer-Gas**	E.röhr-chennr.	Einbring-datum	Gewicht vor Einbringen [g]	Gewicht nach Messung [g]	Uhrzeit Probenahme	Pum-pennr.	TD-Röhr-chennr.	Volumen [L]	Durchflussvolumen [L/min]	Dauer der Probenahme
		HFB1										
		OFT1										
		PFD1										
		HFB2										
		OFT2										
		PFD2										

Quelle: Eigene Darstellung, Bremer Umweltinstitut GmbH

Zusammenfassung aller ausgewerteten Luftwechselraten und Klimadaten

Tabelle A1: Prüfkammermessung bei voreingestellter LWR 0,5 h^{-1}: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	Innen	
F340-3-7	0,40	0,41	0,52	0,43	F340-01	0,53	0,49	0,45	23,1	22,9	0,2	41,4	1000
F340-10-14	0,40	0,42	0,49	0,44	F340-08	0,48	0,46	0,44	23,2	22,3	0,9	40,6	1003
F340-17-21	0,39	0,44	0,48	0,41	F340-15	0,41	0,38	0,37	23,2	22,7	0,5	39,6	1011
F340-24-28	0,41	0,43	0,49	0,42	F340-22	0,44	0,41	0,38	23,8	23,1	0,7	40,5	1011
F340-31-35	0,41	0,42	0,50	0,43	F340-29	0,44	0,41	0,40	23,1	22,9	0,2	42,5	1010

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A2: Prüfkammermessung bei voreingestellter LWR 1,0 h^{-1}: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO2 LWR [h-1]	N2O LWR [h-1]	SF6 LWR [h-1]	CO2 Testo LWR [h-1]	Proben Nr.	HFB LWR [h-1]	OFT LWR [h-1]	PFD LWR [h-1]	Temp. [°C]			rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	Innen	
F340-89	0,82	0,90	1,00	0,84	F340-87	1,14	1,05	0,88	24,6	22,9	1,7	44,3	1013
F340-92	0,80	0,94	1,00	0,76	F340-90	1,04	0,97	0,77	24,3	22,3	2,0	42,6	1007
F340-95	0,84	0,92	1,00	0,82	F340-93	1,03	0,96	0,84	24,5	22,8	1,7	45,2	1005
F340-98	0,83	0,93	1,02	0,79	F340-96	0,99	0,94	0,80	24,7	22,9	1,8	43,2	1004
F340-101	0,82	0,98	0,99	0,78	F340-99	0,96	0,89	0,74	24	22,3	1,7	43,9	1009

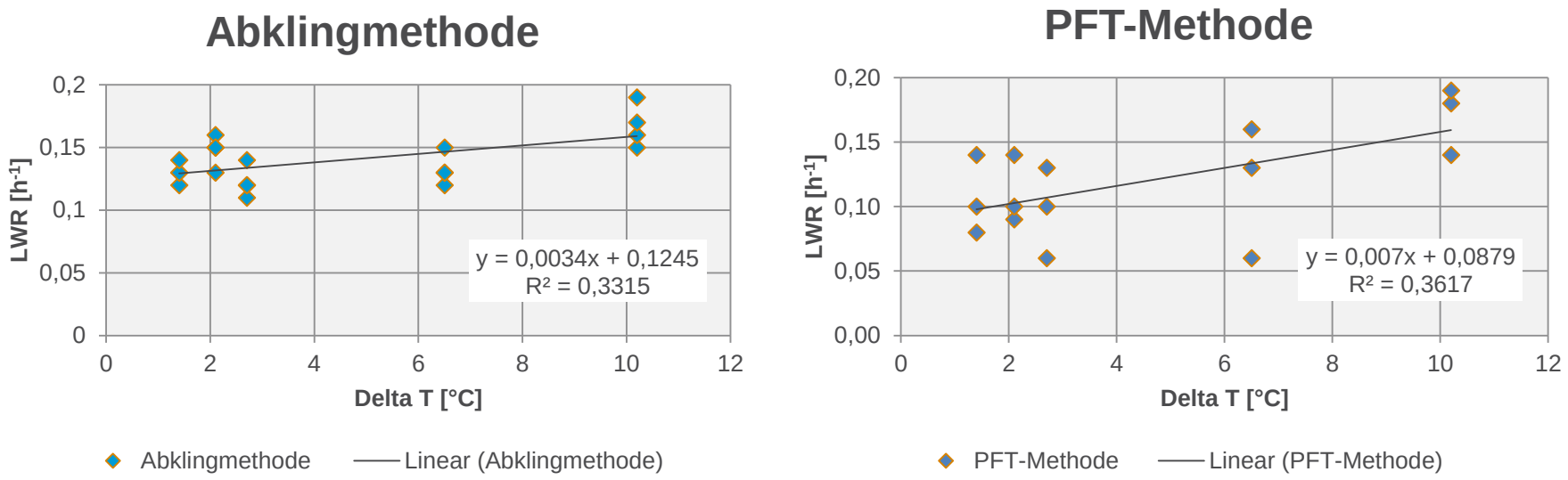
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A3: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 0: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-47	0,16	0,19	0,15	0,17	F341-45	0,18	0,19	0,14	22,9	12,7	10,2	6,4	SSW	52,7	1016
F341-50	0,13	0,13	0,12	0,15	F341-48	0,16	0,06	0,13	24,4	17,9	6,5	4,8	W	51,1	1015
F341-53	0,12	0,12	0,11	0,14	F341-51	0,13	0,06	0,10	23,7	21	2,7	6,4	WWN	53,2	1014
F341-56	0,13	0,13	0,12	0,14	F341-54	0,14	0,08	0,10	23,5	22,1	1,4	11,3	SW	53,6	1013
F341-59	0,15	0,16	0,13	0,15	F341-57	0,14	0,09	0,10	23,4	21,3	2,1	8	SSW	54,1	1012

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A6: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 0: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



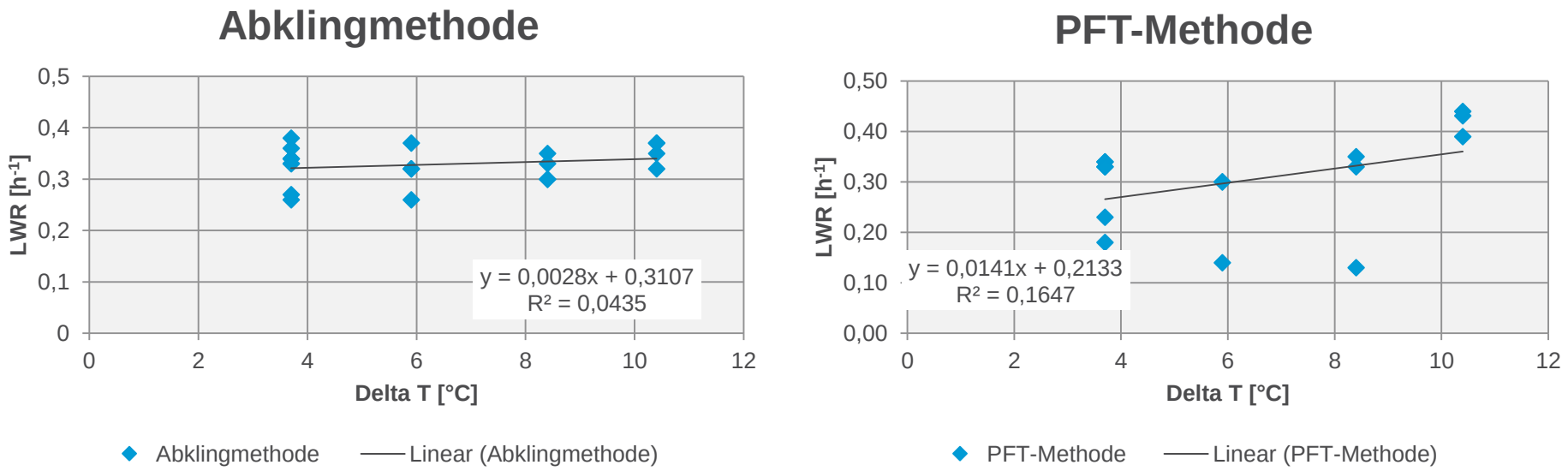
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A4: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 1: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-18	0,32	0,35	0,37	0,37	F341-16	0,39	0,43	0,44	24	13,6	10,4	0	NON	47,0	1009
F341-21	0,30	0,30	0,35	0,33	F341-19	0,33	0,35	0,13	25,6	17,2	8,4	4,8	ONO	44,9	1008
F341-24	0,32	0,26	0,37	0,32	F341-22	0,30	0,30	0,14	24,8	18,9	5,9	11,3	NO	46,1	1007
F341-27	0,33	0,26	0,38	0,33	F341-25	0,33	0,34	0,18	24,6	20,9	3,7	8	ONO	46,6	1005
F341-29	0,34	0,27	0,34	0,36	F341-28	0,34	0,33	0,23	24,4	20,7	3,7	8	SO	47,2	1004

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A7: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 1: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



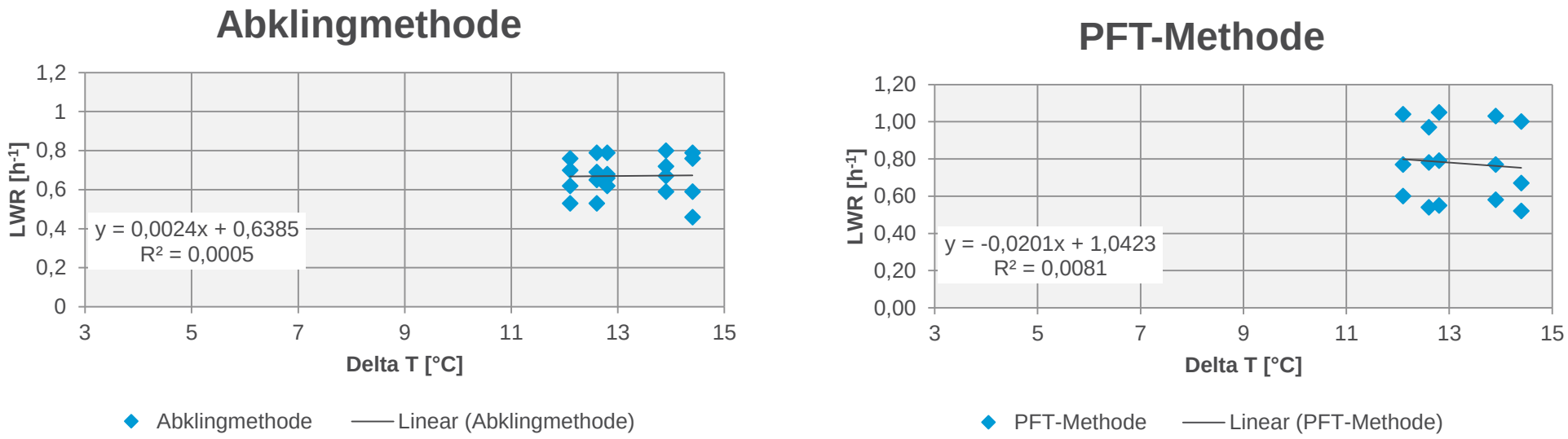
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A5: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 3: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-122	0,59	0,76	0,79	0,46	F341-120	1,00	0,67	0,52	20,5	6,1	14,4	6,4	NO	38	1020
F341-125	0,67	0,72	0,8	0,59	F341-123	1,03	0,77	0,58	20,6	6,7	13,9	1,6	NO	38	1020
F341-128	0,66	0,68	0,79	0,62	F341-126	1,05	0,79	0,55	20,7	7,9	12,8	6,4	NOO	39	1020
F341-131	0,62	0,70	0,76	0,53	F341-129	1,04	0,77	0,60	20,8	8,7	12,1	3,2	OON	39	1021
F341-134	0,65	0,69	0,79	0,53	F341-132	0,97	0,78	0,54	20,9	8,3	12,6	0	NO	39	1021

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A8: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 3: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



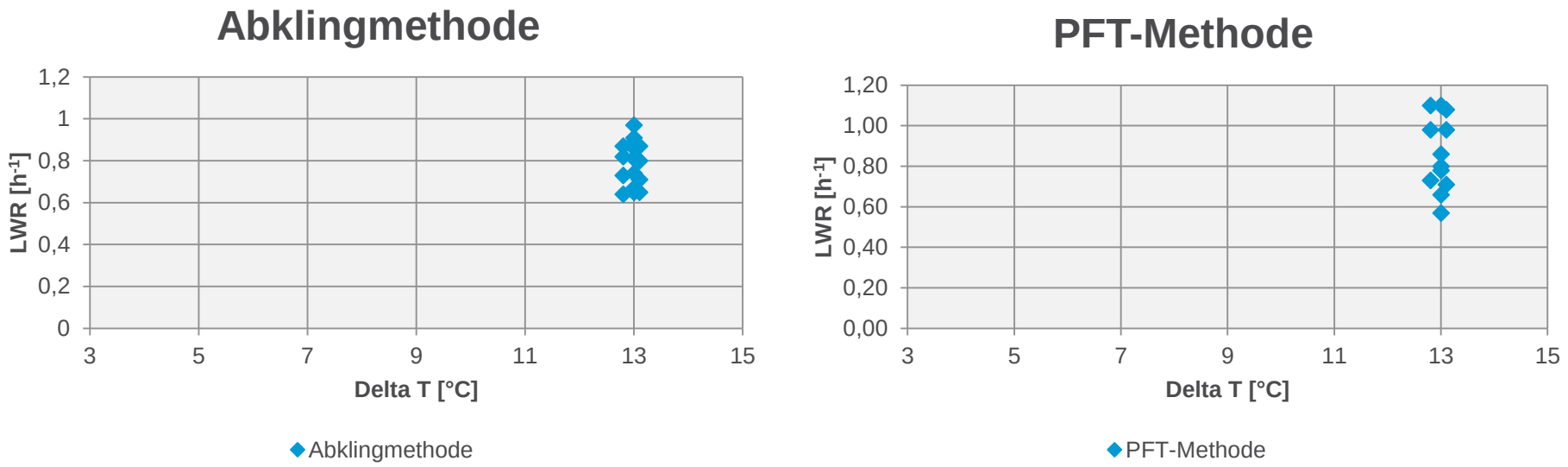
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A6: Realraum-Messungen bei Lüftungsstufe 4: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-173	0,81	0,97	0,91	0,67	F341-171	0,80	0,57	0,78	18,6	5,6	13	0	SW	34	1014
F341-176	0,75	0,87	0,86	k. A.	F341-174	1,06	0,71	0,78	k. A.	5,4	k. A.	0	SW	k. A.	k. A.
F341-179	0,74	0,86	0,89	0,65	F341-177	1,10	0,86	0,66	18,7	5,7	13	0	SWS	33	1011
F341-182	0,71	0,8	0,87	0,65	F341-180	1,08	0,98	0,71	18,7	5,6	13,1	0	SW	34	1009
F341-185	0,73	0,82	0,87	0,64	F341-183	1,10	0,98	0,73	18,6	5,8	12,8	0	W	34	1007

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A9: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung Lüftungsstufe 4: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



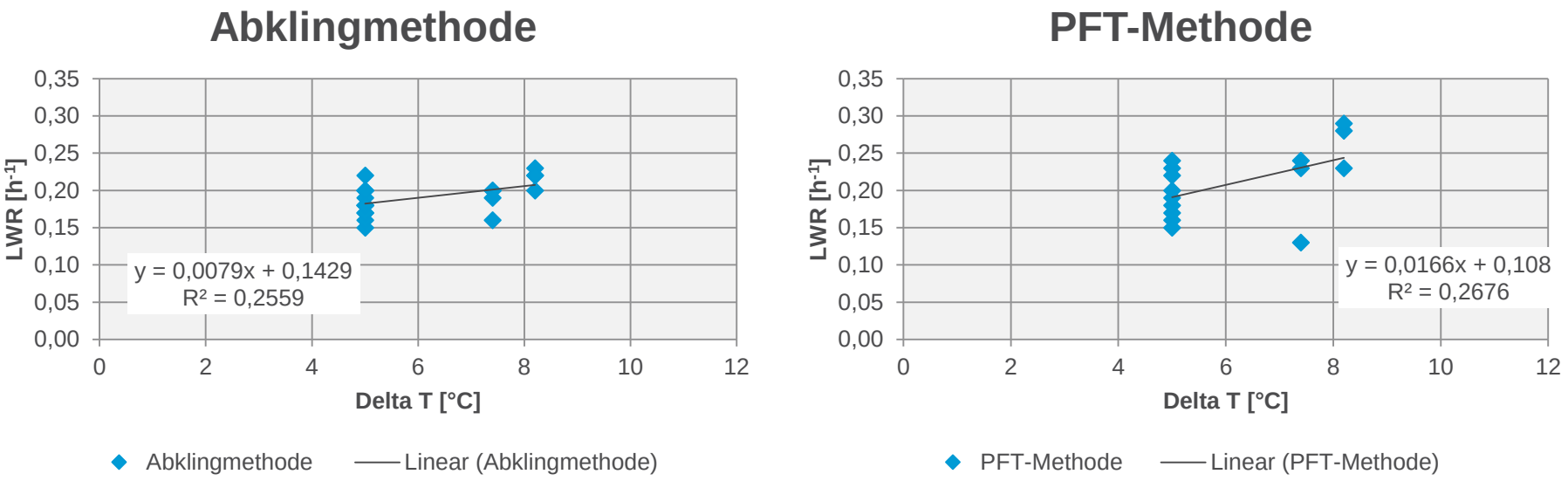
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A7: Realraum-Messungen nach 8 h geschlossenem Fenster: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-3	0,20	0,23	0,22	0,22	F341-1	0,28	0,29	0,23	23,2	15,0	8,2	13	WSW	54,5	1007
F341-6	0,19	0,16	0,20	0,20	F341-4	0,13	0,24	0,23	24,4	17,0	7,4	17	W	51,7	1007
F341-9	0,20	0,20	0,22	0,20	F341-7	0,16	0,23	0,24	24,0	19,0	5	20	WNW	52,3	1008
F341-12	0,17	0,15	0,18	0,18	F341-10	0,17	0,20	0,19	24,0	19,0	5	22	NW	52,1	1008
F341-15	0,17	0,16	0,19	0,18	F341-13	0,18	0,22	0,15	24,0	19,0	5	22	NW	51,6	1009

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A10: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung nach 8 h geschlossenem Fenster: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A8: Realraum-Messungen, Abklingmethode, während und nach 10 min Stoßlüftung: Luftwechselraten

Proben Nr.	CO2 LWR [h-1]			N2O LWR [h-1]			SF6 LWR [h-1]			CO2 Testo LWR [h-1]		
	während	nach	MW 10:110	während	nach	MW 10:110	während	nach	MW 10:110	während	nach	MW 10:110
F341-248	10,50	0,08	0,95	13,12	0,12	1,20	16,23	0,11	1,45	5,77	0,10	0,57
F341-251	9,49	0,09	0,87	11,18	0,12	1,04	13,34	0,13	1,23	6,09	0,11	0,61
F341-254	8,46	0,08	0,78	10,12	0,11	0,94	12,82	0,12	1,18	5,05	0,09	0,50
F341-257	9,81	0,10	0,91	11,38	0,12	1,06	13,80	0,11	1,25	5,82	0,10	0,58
F341-260	10,17	0,07	0,91	12,25	0,11	1,12	14,07	0,12	1,28	5,15	0,08	0,50

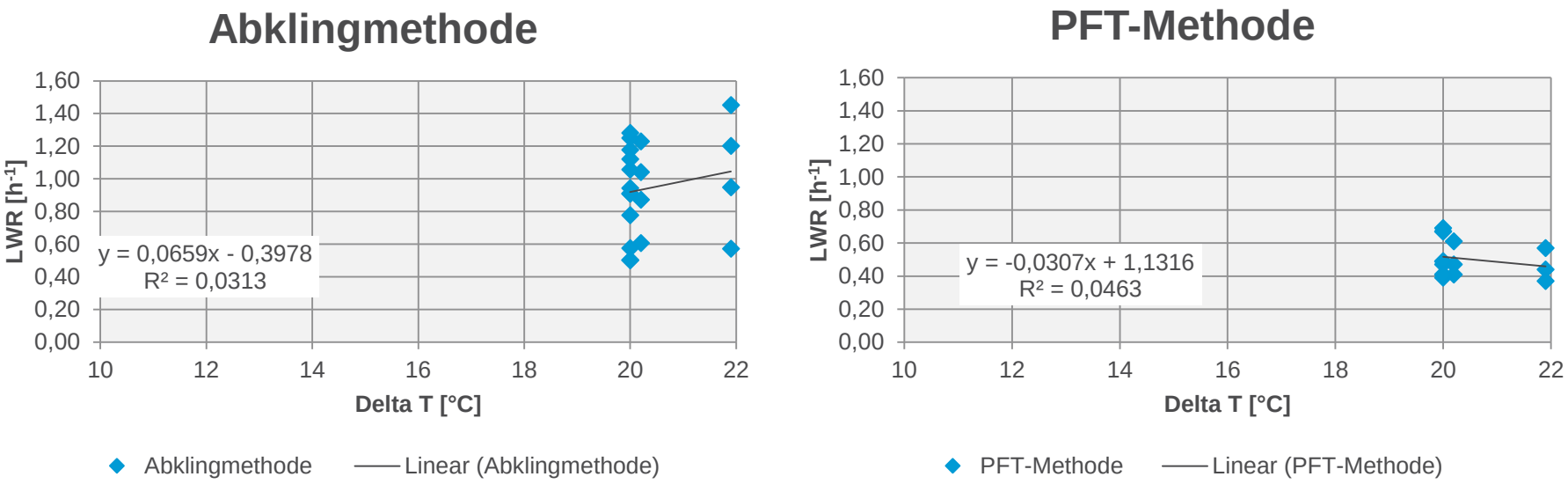
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A9: Realraum-Messungen, PFT-Methode, Mess-Szenario Stoßlüftung: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
				Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-247	0,44	0,57	0,37	21,9	0	21,9	8	na	28	1012
F341-250	0,47	0,61	0,41	22,2	2	20,2	3	na	28	1014
F341-253	0,47	0,67	0,39	22	2	20	10	na	28	1015
F341-256	0,49	0,69	0,41	22	2	20	10	na	28	1016
F341-259	0,49	0,67	0,41	22	2	20	11	na	28	1015

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A11: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung mit Stoßlüftung: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



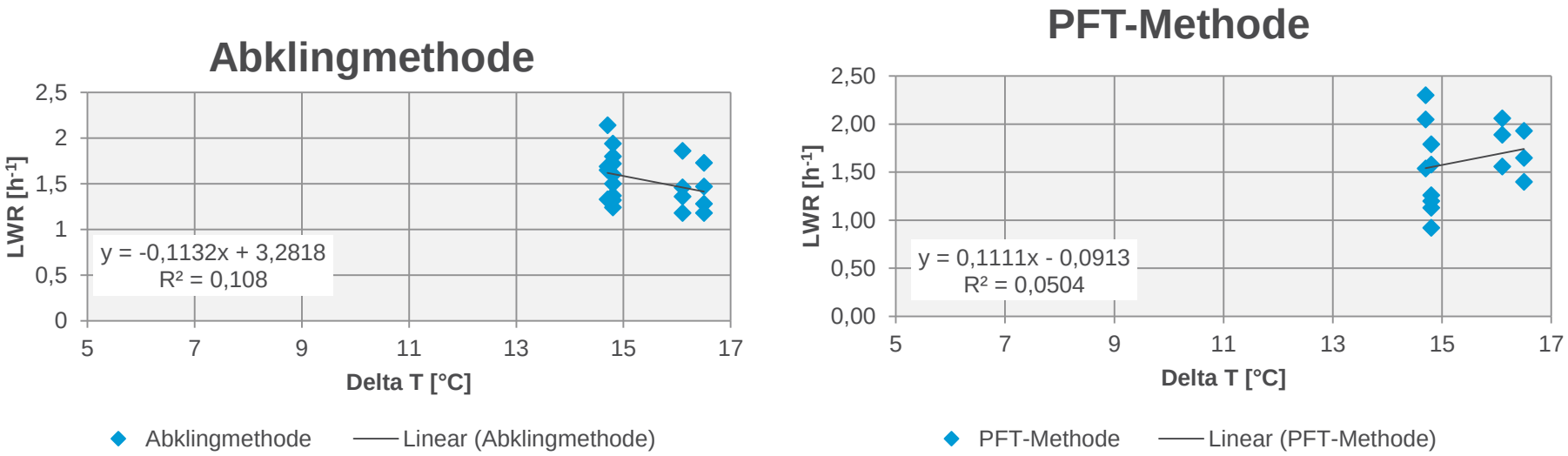
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A10: Realraum-Messungen mit Kipplüftung: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-188	1,37	1,60	1,80	1,24	F341-186	1,26	1,13	0,92	17,9	3,1	14,8	0	SW	36	1003
F341-191	1,50	1,72	1,94	1,32	F341-189	1,79	1,58	1,20	18	3,2	14,8	3,2	SW	34	1003
F341-194	1,65	1,69	2,14	1,33	F341-192	2,30	2,05	1,54	17,9	3,2	14,7	4,8	SWS	34	1003
F341-197	1,36	1,46	1,86	1,18	F341-195	1,89	2,06	1,56	17,9	1,8	16,1	8	SWW	33	1003
F341-200	1,28	1,47	1,73	1,18	F341-198	1,93	1,65	1,40	17,9	1,4	16,5	11,3	SW	33	1004

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A12: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung mit Kipplüftung: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



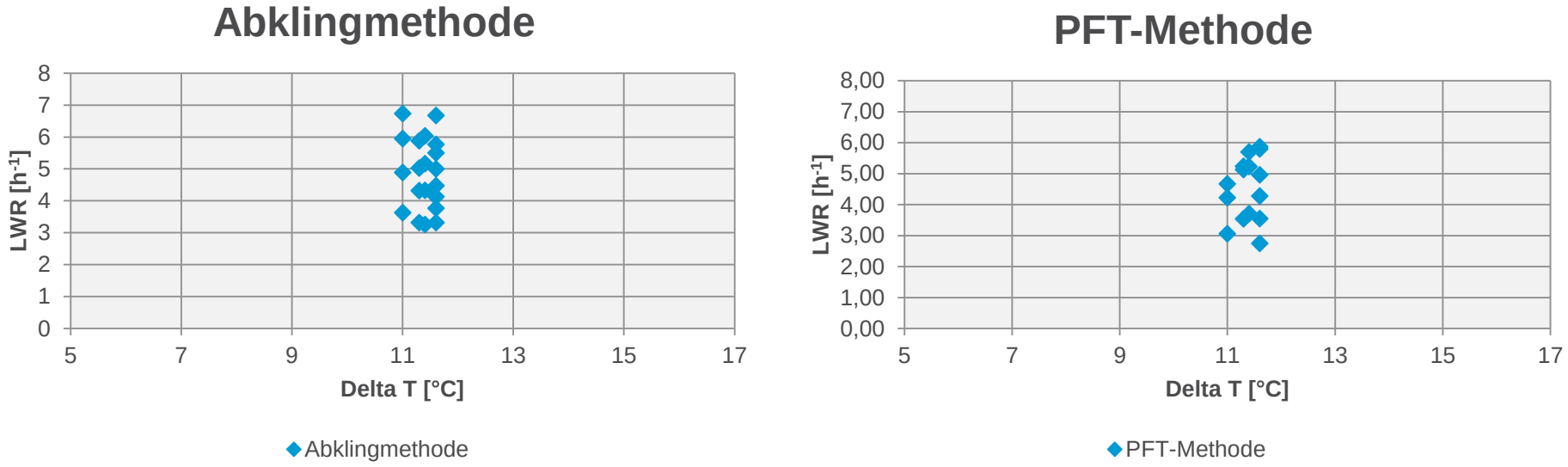
Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Tabelle A11: Realraum-Messungen bei geöffnetem Fenster: Luftwechselraten und Klimadaten

Proben Nr.	CO_2 LWR [h^{-1}]	N_2O LWR [h^{-1}]	SF_6 LWR [h^{-1}]	CO_2 Testo LWR [h^{-1}]	Proben Nr.	HFB LWR [h^{-1}]	OFT LWR [h^{-1}]	PFD LWR [h^{-1}]	Temp. [°C]			Wind		rF [%]	Luftdruck [mbar]
									Innen	Außen	Delta T	v [km/h]	Richtung	Innen	
F341-137	4,48	5,50	6,68	3,77	F341-135	5,87	5,80	3,55	19,5	7,9	11,6	8	W	41	1021
F341-140	4,32	5,03	5,88	3,32	F341-138	5,24	5,13	3,54	19,6	8,3	11,3	4,8	SW	41	k. A.
F341-143	4,13	5,00	5,77	3,32	F341-141	4,28	4,96	2,75	19,8	8,2	11,6	3,2	W	40	1020
F341-146	4,33	5,17	6,04	3,26	F341-144	5,23	5,70	3,71	19,9	8,5	11,4	9,7	SW	40	1020
F341-149	4,89	5,95	6,74	3,63	F341-147	4,22	4,67	3,06	19,8	8,8	11,0	6,4	SW	39	1020

Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH

Abbildung A13: Zusammenhang zwischen gemessener Luftwechselrate und Temperaturgradient. Realraum-Messung bei geöffnetem Fenster: links Abklingmethode, rechts PFT-Methode



Quelle: Eigene Daten, Bremer Umweltinstitut GmbH