



Bremer  
Umweltinstitut<sup>⊕</sup>

Gesellschaft für Schadstoffanalysen  
und Begutachtung mbH



# Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich

**Dr. Norbert Weis**

Bremer Umweltinstitut GmbH

Fahrenheitstr. 1, 28359 Bremen und Akazienweg 56a, 37073 Göttingen

Fon 0421/7 66 65 - mail@bremer-umweltinstitut.de

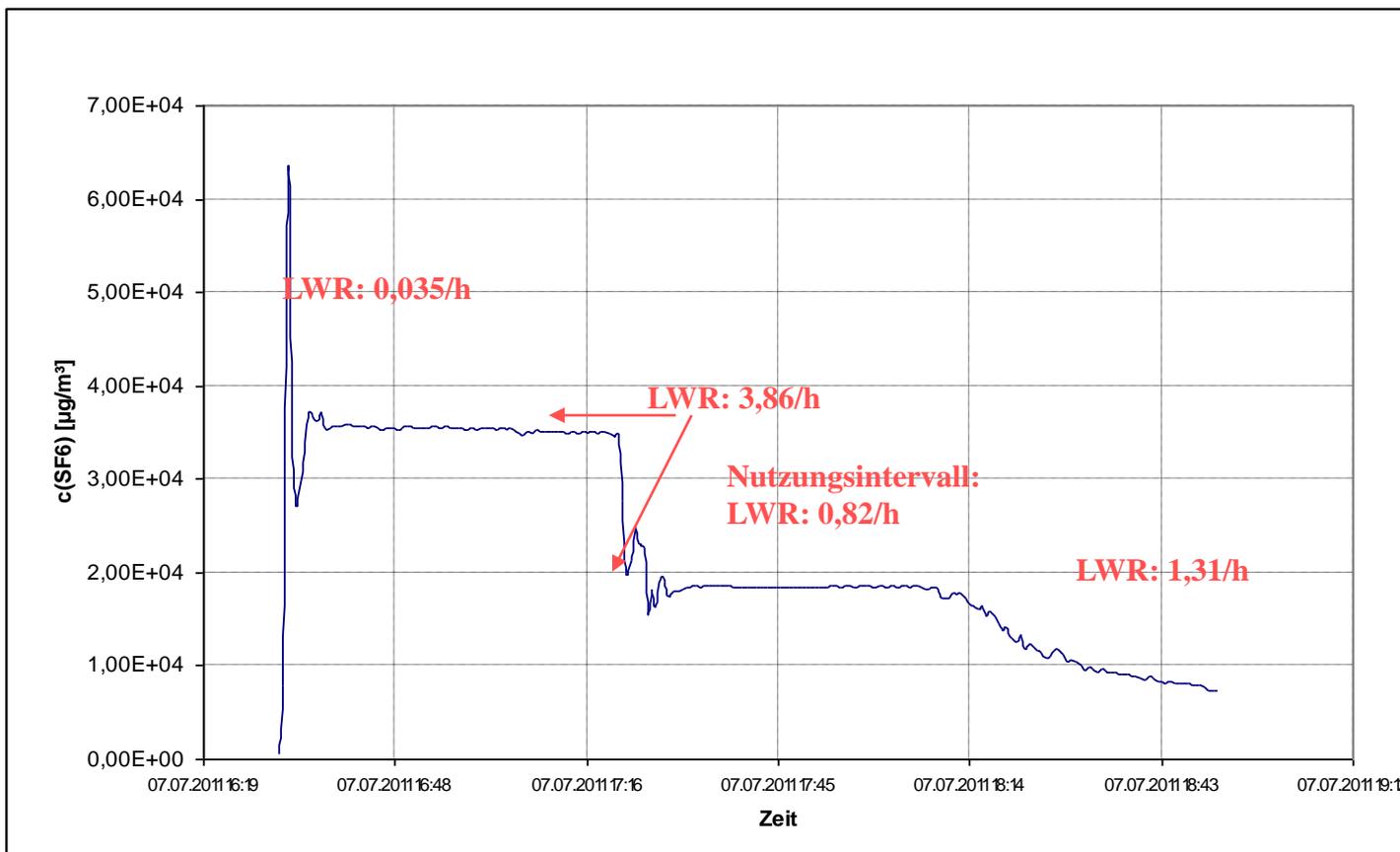
www.bremer-umweltinstitut.de



# Bestimmung der Luftwechselrate – Ein wichtiger Parameter

## Luftwechselrate in einem Schulneubau

Bestimmung mittels Abklingmethode (Tracergas SF<sub>6</sub>)



# Projektbeschreibung

UFOPLAN-Projekt 2016-2018

## „Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich“

- **Literaturrecherche** zum aktuellen Stand und zu gesundheitlicher Bewertung von Tracergasen
- **Methodenvergleich** in kontrollierten Mess-Szenarien
  - Kammer und Realraum
  - Abklingmethode:  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  (Distickstoffmonoxid)
  - Passive Emissionsmethode (PFT): HFB, OFT, PFD



PFT = Perfluorcarbontracer  
HFB = Hexafluorbenzol  
OFT = Octaflourtoluol  
PFD = Perfluordecalin



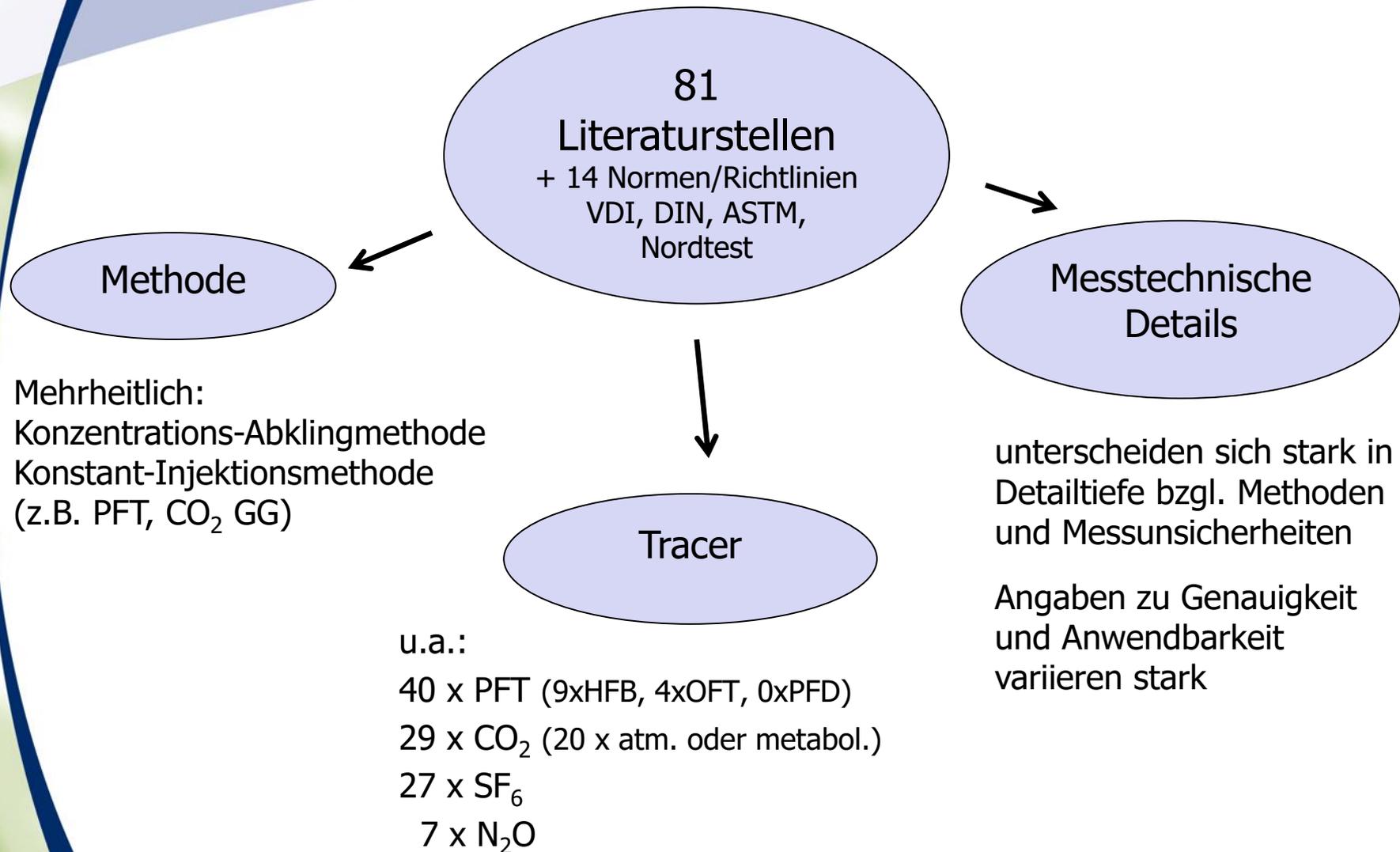
# Literaturrecherche – gesundheitliche Bewertung

<b>Tracergas</b>	<b>Datenlage</b>	<b>Gesundheit</b>	<b>Treibhauspotential</b>
SF <sub>6</sub>	Gut, MAK 1.000 ppm	Unkritisch im Messbereich	GWP 22.800
CO <sub>2</sub>	Gut, MAK 5.000 ppm	Unkritisch im Messbereich	GWP 1
N <sub>2</sub> O	Gut, MAK 100 ppm	Toxikologische Bewertung umstritten	GWP 298
HFB	Wenig	Unzureichende Daten	GWP ~ 1
OFT	Wenig	Unzureichende Daten	GWP ~ 1
PFD	Daten aus medizinischer Anwendung	Wenig Daten, medizinische Anwendung zugelassen	GWP >7500

Quellen für angegebene Werte: MAK 2017, IPCC 2007, EPA GHGRP 2014

HFB = Hexafluorbenzol, OFT = Octafluortoluol, PFD = Perfluordecalin  
GWP = Global Warming-Potential (Treibhauspotential)

# Literaturrecherche – aktueller Stand





# Literaturrecherche – Anwendungsrelevante Aspekte

- Welche Luftflüsse tragen zum Messergebnis bei
- Ein-Zonen- / Multi-Zonen-Ansatz
- Durchmischung / Messpositionen
- Einfluss von Klimaparametern
- Mess- / Auswerteperiode
- analytische Genauigkeit
- Konstanz der LWR über den Messzeitraum
- Methodische Randbedingungen (z.B. Erreichen der Gleichgewichtsbedingungen)
- Referenzpunkte bei Vergleichen variieren
- Vielzahl an verfügbaren Richtlinien und Methodendetails



# Methodenvergleich - Messräume



## 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer

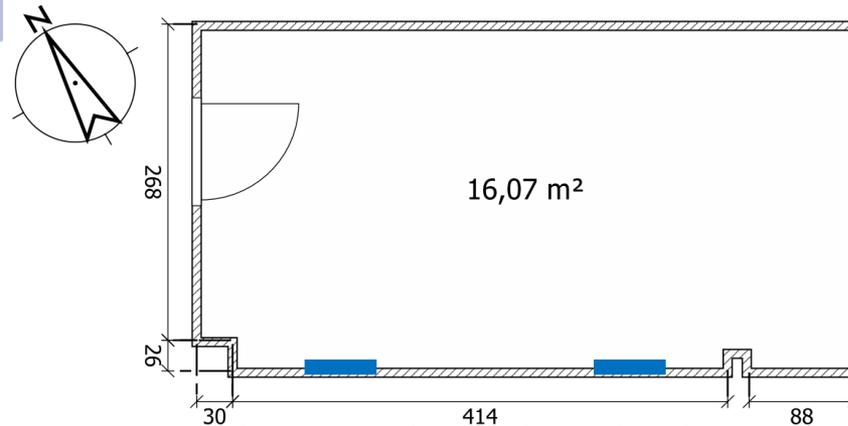
Regelbare Zuluft  
Kontrollierte Klimaparameter



## Bürraum

Technische Lüftung (stufenweise regelbar)  
Fenster  
Vor Projektbeginn: Blower-Door-Test (Ein-Zonen-Ansatz)

# Methodenvergleich - Messräume



— Position Lüftungsventilatoren  
des Lüftungssystems

Volumenströme und theoretische Luftwechselraten im Realraum mit technischer Lüftung

Lüftungsstufe	Volumenstrom Lüftung [m³/h]	Theoretische LWR [h <sup>-1</sup> ]	Erste Messung LWR [h <sup>-1</sup> ]
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

## **I. Konzentrations-Abklingmethode**

- SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O
- Tracer Injektion aus Gasflasche / Teflonbeutel
- Probenahme und Analyse photoakustischer Monitor Innova 1312
- Auswertung über Regressionsmethode



# Methodenvergleich - Messmethoden

## II. Passive Emissionsmethode (PFT-Methode)

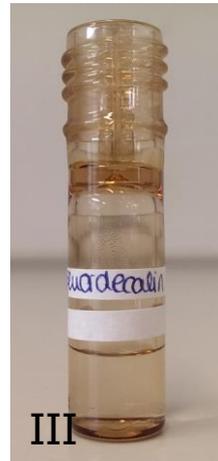
- HFB, OFT, PFD
- Konstant emittierende Emissionsröhrchen für Tracergase (Emissionsquellen: Aufbau, Konstanz und Höhe der Emission überprüft)
- Aktive Probenahme (BIVOC 2) auf Doppelbettröhrchen
- Analyse und Auswertung TD-GC/MS



I



II



III



IV

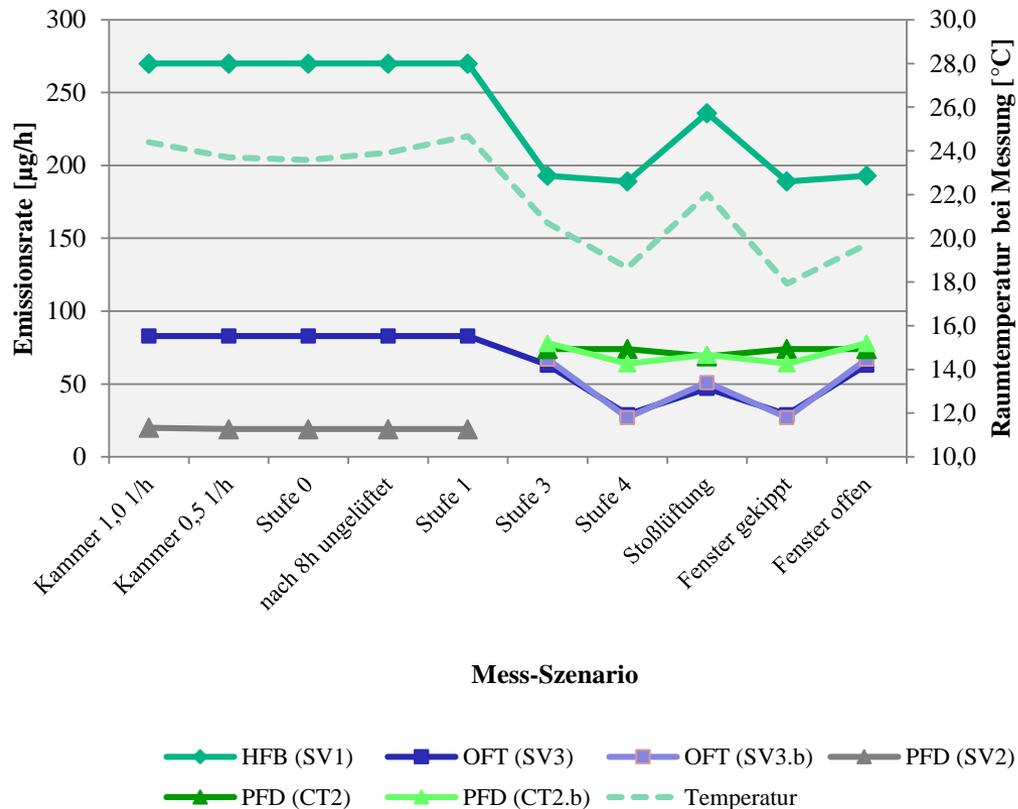


V

I Emissionsröhrchen nach VDI 4300 Blatt 7 (Permeation): HFB = Hexafluorbenzol, OFT = Octafluortoluol, Ø PFD  
II Emissionsröhrchen nach Shinohara 2010 (Diffusion): PFD = Perfluordecalin + HFB, OFT bei hohen LWR  
III Emissionsröhrchen Certan®: PFD bei hoher LWR  
IV + V Glasvial 2 ml und 9 ml nur für Feststoff PFN (Perfluornaphthalin)

# Methodenvergleich – Validierung PFT-Methode

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





# Methodenvergleich – Validierung PFT-Methode

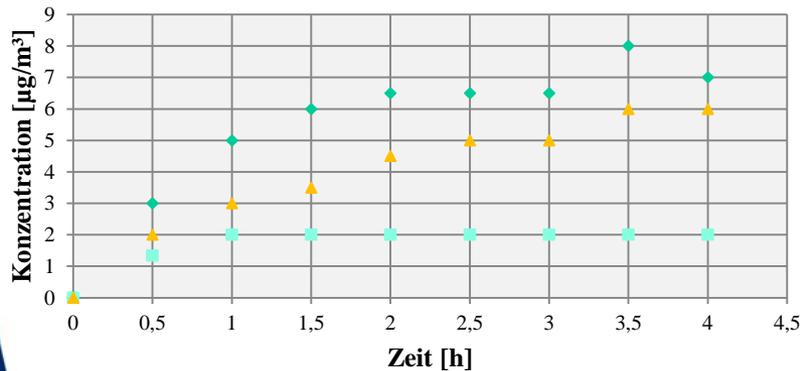
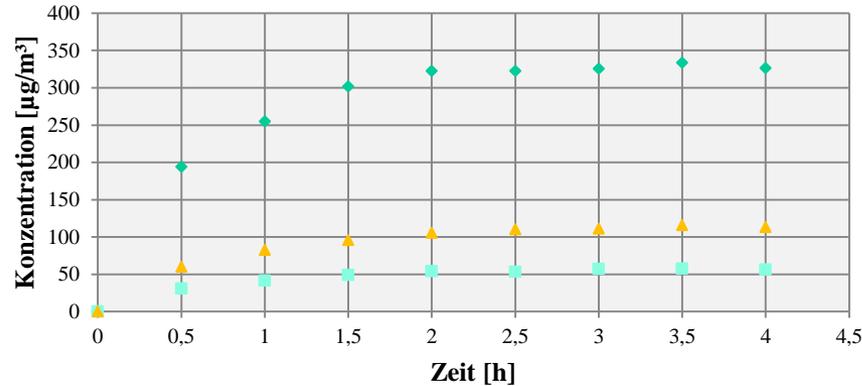
Erfolgreiche Validierung in Labor und 1 m<sup>3</sup>-Kammer

<b>Parameter</b>	<b>Labor</b>
Equilibrierzeit Kammer	2 h
Selektivität	✓
Spezifität	✓
NG	0,06 – 0,09 µg/m <sup>3</sup>
Arbeitsbereich	2 – 650 µg/m <sup>3</sup>
Richtigkeit dotiert	74 – 109%
Richtigkeit Kammer	85 – 91%
Wiederholpräzision dot.	RSD < 14%
Wiederholpräzision Kammer	RSD < 5%
Robustheit Lagerung	14 Tage; RT / 8°C

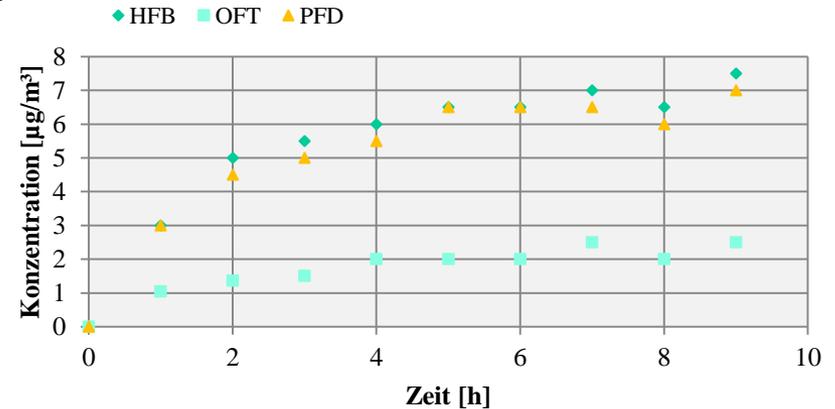
# Methodenvergleich – Validierung PFT-Methode

## Bestimmung der Sättigungskurve der Tracergase

Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD in einer 1 m<sup>3</sup> Prüfkammer bei eingestellter LWR von 1 h<sup>-1</sup>



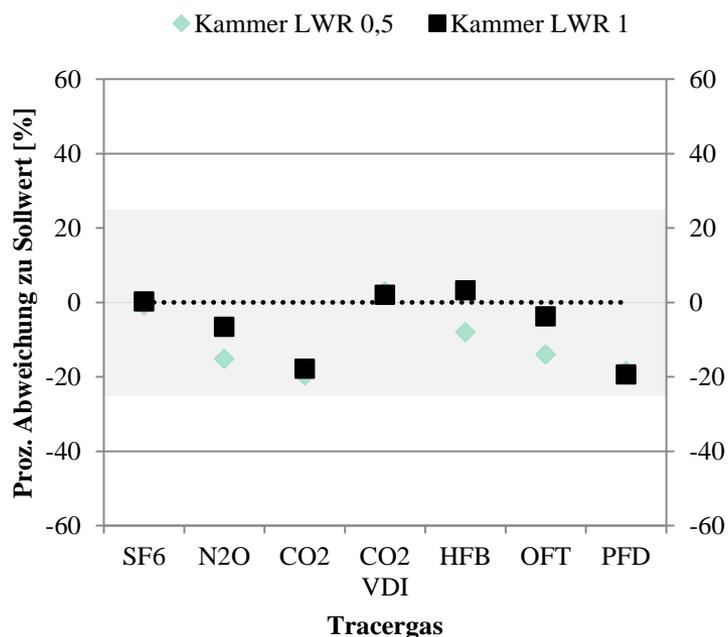
Sättigungskurven für HFB, OFT und PFD im Realraum...  
...bei Lüftungsstufe 4



...bei Lüftungsstufe 2

# Methodenvergleich – Kammer-Messungen

- Gemessen wurde mit 6 Tracern je fünfmal in 1 m<sup>3</sup>-Glaskammer
- Voreingestellter Luftwechsel 0,5 h<sup>-1</sup> und 1,0 h<sup>-1</sup>
- Messdauer PFT 10 min, Abklingmethode 120 min



- Alle Methoden/Tracer:  $\Delta < 20\%$
- Abklingmethode:
  - SF<sub>6</sub>: hohe Genauigkeit ( $\Delta_{\max}$  1%)
  - CO<sub>2</sub> Hintergrundproblematik in Kammer beherrschbar
- PFT-Methode:
  - HFB: hohe Genauigkeit ( $\Delta_{\max}$  8%)
  - PFD größte Unsicherheit

Anmerkung zu CO2 VDI: Eigene Daten in Ergänzung zu Abschlussbericht

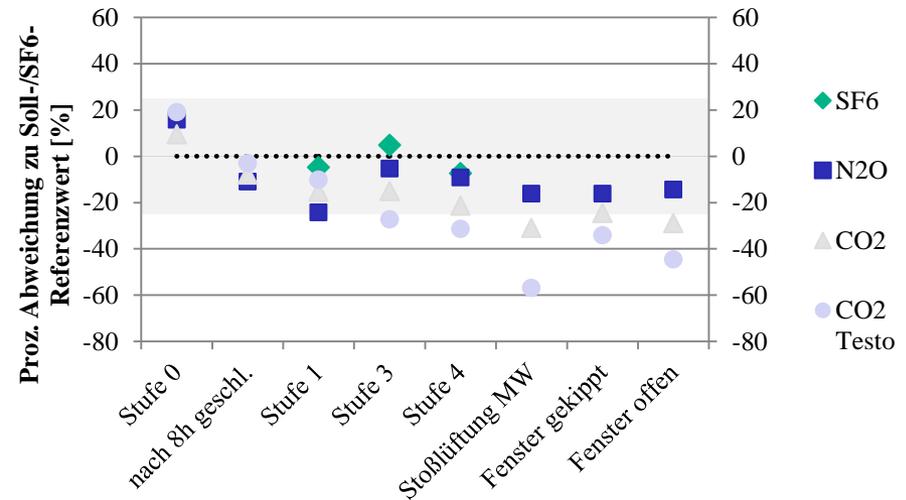
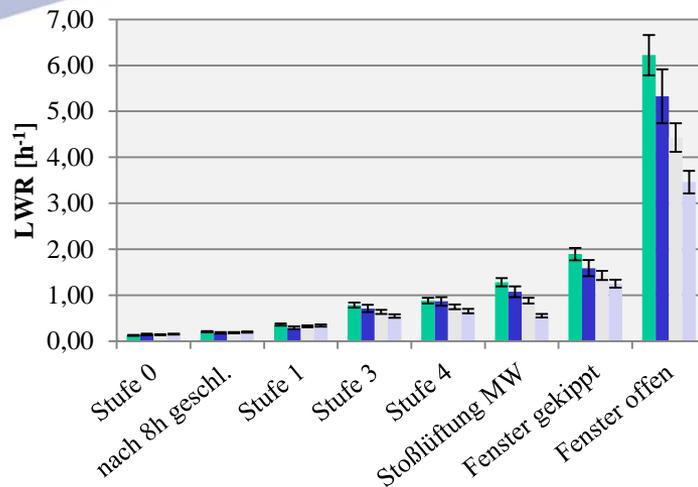


# Methodenvergleich – Realraum-Messungen

- Gemessen wurde mit 6 Tracern je fünfmal für folgende Szenarien:
  - Lüftung ausgeschaltet und abgedichtet (Referenz SF<sub>6</sub>)
  - Lüftung ausgeschaltet (Referenz SF<sub>6</sub>)
  - Lüftungsstufen 1, 3 und 4 (Sollwert nach Herstellerangaben Lüftung)
  - Kipplüftung (Referenz SF<sub>6</sub>)
  - Stoßlüftung (Referenz SF<sub>6</sub>)
  - Geöffnetes Fenster (Referenz SF<sub>6</sub>)
- Durchmischung Abklingmethode und Equilibrierzeit PFT-Methode überprüft (RSD Messpositionen < 10%, Equilibrierzeit Stufe 2 und 4)
- Messdauer PFT 10 min, Abklingmethode 120 min (Auswertezeitraum in halblogarithmischer Darstellung bestimmt)



# Methodenvergleich – Realraum-Messungen Abklingmethode

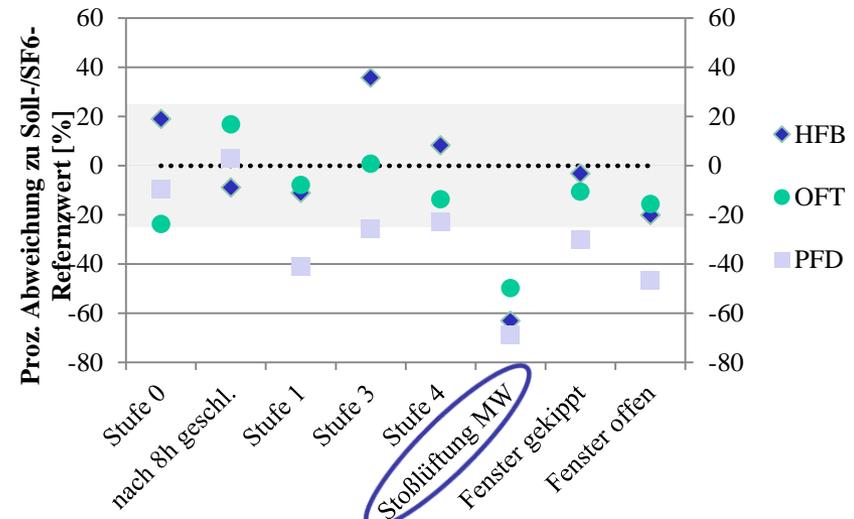
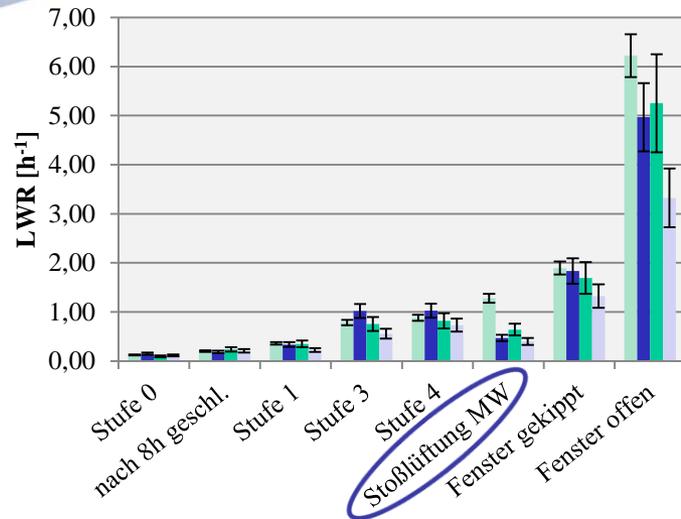


Tracer	Gesundheit	Ökologie	Messtechnik	Genauigkeit / Varianz
SF <sub>6</sub>	Unkritisch im Messbereich	GWP sehr hoch	Hohe Dichte (Durchmischung krit.)	$\Delta_{\max}$ 7% RSD <sub>max</sub> 12%
CO <sub>2</sub>	Unkritisch im Messbereich	GWP Referenzwert	<a href="#">Hintergrundwerte</a> , Querempfindlichkeit	$\Delta_{\max}$ 31% RSD <sub>max</sub> 12%
N <sub>2</sub> O	Toxikolog. umstritten	GWP hoch	Wasserlöslich, Querempfindlichkeit	$\Delta_{\max}$ 24% RSD <sub>max</sub> 20%



# Methodenvergleich – Realraum-Messungen

## PFT-Methode



Tracer	Gesundheit	Ökologie	Messtechnik	Genauigkeit / Varianz
HFB	Unzureichende Daten	GWP ~ Referenzwert	Stabilität der Emissionsquellen, Temp.abhängig, Equilibrierzeit (Langzeit-MW)	$\Delta_{\max}$ 36 (63)% RSD $_{\max}$ 31%
OFT	Unzureichende Daten	GWP ~ Referenzwert		$\Delta_{\max}$ 24 (50)% RSD $_{\max}$ 56%
PFD	Wenig Daten, med. Anwendung	GWP hoch		$\Delta_{\max}$ 47 (69)% RSD $_{\max}$ 57%



# Zusammenfassung

- ✓ Methodenvergleich und Literaturlauswertung zeigen die prinzipielle Eignung beider Methoden (Trends, Größenordnung)
- ✓ Abklingmethode stabiler und genauer für Kurzzeitmessungen, Langzeitmessungen mit PFT-Methode möglich
- ✓ Methode und Gas müssen für die Fragestellung ausgewählt werden (z.B. Kurzzeit- vs. Langzeitmessungen, benötigte Gasmenge und Konzentration)
- ✓ Messunsicherheiten können in realen Szenarien groß sein, daher müssen die Randbedingungen der Methoden und die Eigenschaften der Gase in der Messplanung berücksichtigt werden
- ✓ Ausreichende Dokumentation der Mess- und Auswerteparameter ist notwendig (Klimaparameter können v.a. bei natürlicher Belüftung relevant sein)
- ✓ Methoden mit metabolischem/atmosphärischen Tracern noch nicht ausreichend validiert

... mein Dank geht an das  
ganze Team und ....



...insbesondere an Dr. Chris Vanessa Hutter-Sumowski,  
Alina Meyer und Dr. Britta Neuweger

sowie an das Umweltbundesamt für die Projektförderung  
und Frau Anja Daniels und Herrn Klaus-Reinhard Brenske  
für die Unterstützung und konstruktive Diskussion



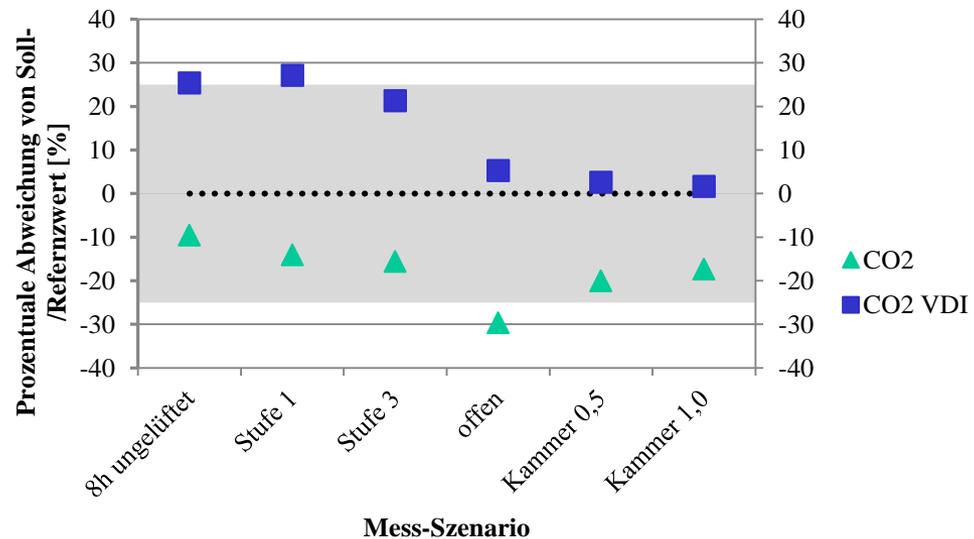
Bremer  
Umweltinstitut<sup>⊕</sup>

Gesellschaft für Schadstoffanalysen  
und Begutachtung mbH



... vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

# CO<sub>2</sub>-Hintergrundproblematik



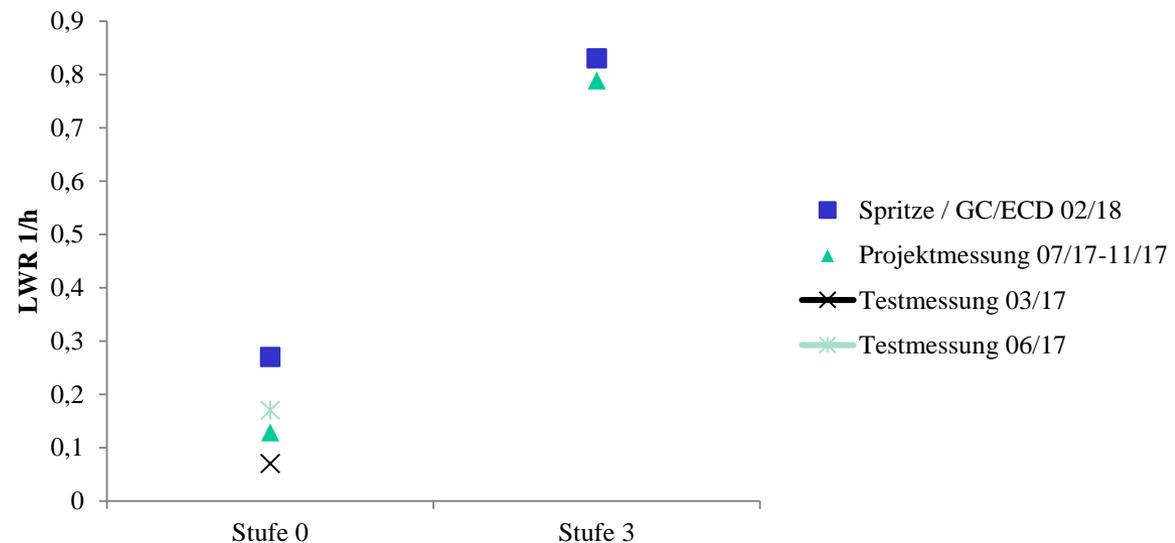
Quelle: Eigene Daten in Ergänzung zu Abschlussbericht

In realen Szenarien:  
Hintergrund schwankt über Messzeit und kann in  
verschiedenen angrenzenden Bereichen (Luftzufluss)  
unterschiedlich und daher schwer zu bestimmen sein  
[Zurück zu Ergebnissen](#)

# Vergleich SF<sub>6</sub>: Innova Direktmessung vs. GC/ECD

Messungen mit SF<sub>6</sub> - Abklingmethode im Büroraum bei  
Lüftungsstufen 0 und 3

Vergleich Probenahme mit Spritze und Laboranalyse GC/ECD  
vs. direktanzeigender Monitor Innova 1312



Quelle: Eigene unveröffentlichte Daten

Methoden, Auswertungen, Ergebnisse:

Abschlussbericht UFOPLAN-Projekt „Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich“, 2018

MAK- und GWP-Werte:

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>.

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.

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](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf).