

# Der Mehrwert von Tracergasmessungen bei Innenraumluftuntersuchungen

W. Raatschen

**Zusammenfassung** Zur Bewertung der Luftqualität von Innenräumen werden häufig Raumbelastungsstoffe gemessen und quantifiziert, wobei die Belüftung des Raumes nur qualitativ beschreibend im Prüfprotokoll festgehalten wird. Da die Raumluftkonzentration umgekehrt proportional zur Durchlüftung eines Raumes ist, bedeutet dies: hohe Durchlüftung – niedrige Konzentration, geringe Durchlüftung – hohe Konzentration. Zur Interpretation einer Raumluftkonzentration gehört also auch die Angabe des Luftwechsels. In diesem Beitrag wird ein einfaches und insbesondere wirtschaftliches Verfahren zur Quantifizierung von Luftströmungen beschrieben, die Spritzenmethode. Damit können die Randbedingungen für anlassbezogene Luftqualitätsmessungen quantitativ beschrieben, Abhilfestrategien entwickelt und Erfolgskontrollen vorgenommen werden. Anhand von Beispielen aus der Praxis werden typische Probleme und Lösungshilfen erläutert. Weiterhin werden die Tracergasverfahren und Tracergase bezüglich ihres Vorbereitungs- und Analysenaufwandes und ihrer Umweltfreundlichkeit bewertet.

## Added value of tracer gas measurements for investigations of indoor air quality

**Abstract** In order to assess indoor air quality problems most often only room contaminants are measured, and the ventilation is just briefly described. However, there is a direct reverse proportionality between room concentration and air change rate (ACR): high ACR – low room concentration, low ACR – high room concentration. To properly interpret a contaminant concentration in a room the knowledge of the ACR is essential. This paper describes a simple and very economic test procedure to measure air flows, the tracer gas syringe method. Applying the syringe method allows to quantify air flows and air flow pattern in a room, to support the evaluation of remedial measures and to help the interpretation of the success parameters. Typical problems in real buildings and their solutions are explained. Furthermore, diverse tracer gases and tracer gas methods will be explained and compared with respect to preparation and analysis effort and with respect to their environmental impact.

## 1 Einleitung

Die Richtlinienreihe VDI 4300 beschreibt in ihren verschiedenen Blättern Vorgehensweisen und Verfahren zur Messung und Bewertung von Innenraumluftparametern. Die kontroversen Diskussionen zur Messstrategie zeigen, dass das Potenzial von Tracergasmessungen noch nicht ausreichend bekannt ist. So wird z. B. empfohlen, vor VOC-Messungen den Raum gut zu lüften und dann über Nacht zu warten, bis sich die bei normaler Raumnutzung üblichen Schadgaskonzentrationen eingestellt haben. Welcher tatsächliche Luftwechsel (LW) sich bei der Konzentrationsmessung am nächsten Tag wirklich eingestellt hat, bleibt aber unbekannt.

Dr.-Ing. Willigert Raatschen,  
TracerTech GmbH, Immenstaad am Bodensee.

In der Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 ist im Speziellen die Messung der Luftwechselzahl (LWZ) festgehalten. Die Schätzung einer LWZ ist mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Wird z. B. eine Butanolkonzentration von  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bei einem LW mit  $n = 0,2 \text{ h}^{-1}$  gemessen, wäre diese bei einem LW mit  $n = 0,6 \text{ h}^{-1}$  um den Faktor 3 geringer, also nur  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Somit könnte also theoretisch der Fall eintreten, dass bei einer Erstmessung bei  $n = 0,6 \text{ h}^{-1}$  eine Konzentration von  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen wird, durch eine Sanierungsmaßnahme 50 % der Butanolquellen beseitigt werden und bei der Nachmessung bei einem LW mit lediglich  $n = 0,2 \text{ h}^{-1}$  festgestellt wird, dass die Butanolkonzentration mit  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  höher als vor der Sanierung ist. Dieses hypothetische Beispiel zeigt, dass eine Konzentrationsmessung allein durchaus zu einer Fehlinterpretation führen kann. Des Weiteren herrscht eine große Unsicherheit in der Beurteilung von möglichen Konzentrationsgradienten innerhalb eines Raumes. Sind Schadgase mit der Raumluft gut durchmischt oder gibt es lokale Spitzen? Wie diese Unsicherheiten in der Praxis beseitigt und mit einer Tracergasmessung die Qualität und Aussagekraft einer Luftqualitätsmessung verbessert werden kann, wird im Folgenden erläutert.

## 2 Tracergasmessungen

### 2.1 Methoden zur Luftwechsellmessung

Nachfolgend werden die zwei in der Praxis gebräuchlichen Verfahren für Luftwechsellmessungen erläutert. Neben diesen gibt es noch die Konstantkonzentrationsmethode, die aber fast ausschließlich und auch nur selten im wissenschaftlichen Bereich Anwendung findet und deshalb hier nicht erläutert wird.

#### 2.1.1 Konzentrationsabklümmethode

Man injiziert ein Tracergas in einen Raum, vermischt es gut mit der Raumluft und nimmt den zeitlichen Konzentrationsabfall mit einem Analysengerät auf oder sammelt in zeitlichen Abständen Proben, die später im Labor analysiert werden. Während der gesamten Messzeit muss das Tracergas gut im Raum vermischt sein. Das ist bei einer normgerechten Luftwechsellmessung (LWM) messtechnisch nachzuweisen. Aus dem Konzentrationsabfall berechnet man dann die LWZ. Die Konzentrationsabklümmethode wird etwa in 90 % der Fälle angewendet.

#### 2.1.2 Step-Up-Methode

Man injiziert einen zeitlich konstanten Tracergasstrom in den Raum, versucht während des gesamten Konzentrationsanstiegs im Raum eine örtlich einheitliche Konzentration durch gute Vermischung zu erreichen und berechnet aus dem Konzentrationsanstieg oder der Endkonzentration die LWZ.

### 2.2 Gleichgewichtskonzentration

In einem normalen Raum mit konstanter Raumtemperatur werden sich bei der Änderung des LW auch unterschied-

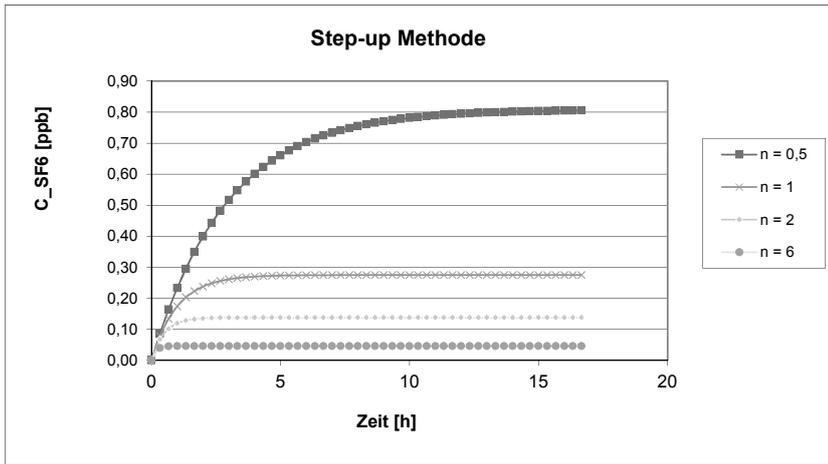


Bild 1. Einstellen der Gleichgewichtskonzentration in Abhängigkeit vom Luftwechsel nach intensiver Raumlüftung.

liche Raumluft-Gleichgewichtskonzentrationen einstellen. Wie schnell dieser Ausgleich vor sich geht, zeigt **Bild 1**. Wenn zuvor über gutes Lüften die Schadgaskonzentration auf null geht und anschließend Fenster und Türen geschlossen werden, baut sich bei konstanter Emissionsrate eine Schadgaskonzentration je nach herrschendem LWZ und der Quellstärke auf. Es ist zu erkennen, dass es bei geringen LWZ länger dauert, in einen Gleichgewichtszustand zu kommen als bei höheren. Den Kehrwert der LWZ bezeichnet man als nominelle Zeitkonstante  $\tau_n$ :

$$\tau_n = \frac{1}{n} \tag{1}$$

So werden nach der Zeit  $\tau_n$  bereits 65,2 % der Endkonzentration, nach  $2 \tau_n$  86,5 %, nach  $3 \tau_n$  95 % und nach  $4 \tau_n$  98,2 % erreicht sein. Entsprechend Bild 1 muss man bei  $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$  insgesamt 8 h warten, um über die 98-%-Schwelle zu kommen, während es bei  $n = 6 \text{ h}^{-1}$  nur 40 min dauert.

Für eine VOC-Messung kann man nach [1], Abschnitt 6.2.2.2 und 6.2.2.3, vor einer Messung durchaus lüften. Dann hat man je nach LWZ allerdings eine gewisse Zeit zu warten, bis die Gleichgewichtskonzentration erreicht ist. Über Gl. (2) lässt sich für jede LWZ leicht berechnen, nach wie vielen Stunden die 98-%-Schwelle erreicht ist.

$$t = -\frac{\ln 0,018}{n} [h] \tag{2}$$

Die 95-%-Schwelle ergibt sich nach Gl. (3)

$$t = -\frac{\ln 0,05}{n} [h] \tag{3}$$

erreicht. Üblicherweise ist die LWZ vor der Messung nicht bekannt. Hier erfolgt dann eine konservative Abschätzung. Gl. (2) zeigt, dass die Empfehlung in [1], bei natürlich belüfteten Räumen vor der VOC-Messung gut zu lüften und danach 8 h und bei maschinell belüfteten Räumen 3 h zu warten, nicht ausreichend ist. Bei natürlich belüfteten Räumen mit  $n < 0,5 \text{ h}^{-1}$  oder bei maschinell belüfteten Räumen mit  $n < 1,3 \text{ h}^{-1}$  haben sich nach 8 h bzw. 3 h noch keine Gleichgewichtskonzentrationen eingestellt. Es ist deshalb sinnvoller, einen relativ konstanten Luftwechsel

vorausgesetzt, vorher nicht zu lüften, da sich der Gleichgewichtszustand bereits eingestellt hat.

### 2.3 Lokales Alter der Luft

Eine LWZ gibt an, wieviel Luft in einen Raum hinein- und aus ihm auch wieder hinausströmt. Sie gibt aber keinen Hinweis darauf, ob die Luft von außen, aus einem Nebenraum oder aus einer Lüftungsanlage kommt. Ebenso sagt sie nichts über die Verteilung der einströmenden Luft im Raum selbst aus, da die Luft während der Messung ja mit dem Tracergas vermischt werden muss. Obwohl die LWZ begleitend zur VOC-Messung zur Quellstärkenbestimmung verwendet werden kann, gibt es andere Fragestellungen, bei denen die LWZ keine ausreichende Hilfestellung bietet – z. B. dann, wenn bestimmte Bereiche im Raum vom LWZ nur eingeschränkt beeinflusst werden (z. B. Raumnischen



Bild 2. Links: Schlafzimmer mit Feuchtproblemen hinter dem Schrank. Rechts: Probenahme an einem Schlauch, der hinter den Schrank verlegt wurde.

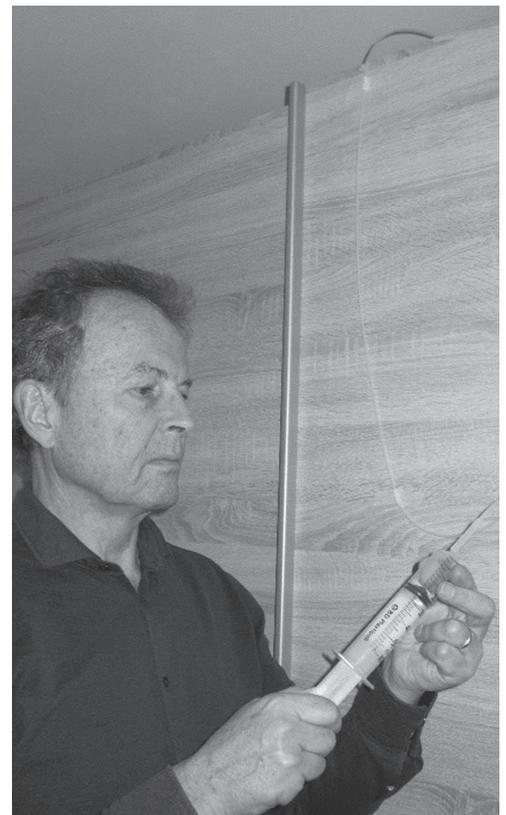


Bild: TracerTech

oder Luftspalte zwischen Wand und Schränken), oder Fragestellungen zur Luftqualität in der Aufenthaltszone von Produktionsstätten.

Betrachtet man z. B. das Schlafzimmer in Bild 2, so scheint es zunächst wahrscheinlich, dass der Luftspalt hinter dem Schrank nur eingeschränkt am Luftaustausch teilnimmt. Nun würde es mit der Spritzenmethode leichtfallen, im Luftspalt Proben zu nehmen und dort eine lokale LWZ zu bestimmen.

Nur ist das leider nicht korrekt, denn zu einer LWM gehört immer ein fest begrenztes Raumvolumen mit einer überall gleichen Konzentration. Das ist hier nicht gegeben. Es wird eine Punktmessung durchgeführt, bei der 30 cm weiter schon wieder eine andere Konzentration herrschen kann. Abhilfe schafft hier die Methodik vom Alter der Luft, die in den 1980er-Jahren entwickelt wurde.

Bild 3 zeigt Strompfade von Luftmolekülen durch einen Raum von der Zu- bis zur Abluftöffnung, die alle durch einen festen, aber beliebig gewählten Punkt P im Raum gehen. Ein bei 1' in den Raum eintretendes Luftmolekül kann auf unterschiedlichsten Wegen den Punkt P erreichen und benötigt hierzu unterschiedlich lange. Die unendliche Vielzahl von möglichen Wegen zum Punkt P liegt in der Zufälligkeit der Turbulenz der Raumluft begründet, die sich nicht vorherbestimmen lässt. Um nicht einzelne Moleküle betrachten zu müssen, bedient man sich der Statistik und errechnet eine Durchschnittszeit. Bei Punkt P haben die Luftmoleküle, gerechnet vom Eintrittsort 1', ein gewisses Alter  $\tau_p$ , das sogenannte *local mean age*, erreicht. Ist das lokale Alter am Punkt P jetzt geringer als die nominale Zeitkonstante  $\tau_n$ , dann wird diese Stelle besser als der Durchschnitt der Raumpunkte durchströmt. Ist das lokale Alter höher, dann dauert es länger, diese Stelle im Raum mit Frischluft zu versorgen – sie wird also schlechter durchströmt.

Die Berechnung von  $\tau_p$  erfolgt nach Gl. (4).

$$\tau_p = \frac{1}{c_p} \cdot \int_{t=0}^{\infty} c_p(t) dt \quad (4)$$

Aufgrund der endlichen Anzahl von Messpunkten wird in der Praxis meist eine Summierung der Einzelflächen ( $c_p(t) \cdot \Delta t$ ) durchgeführt, um  $\tau_p$  zu berechnen und im Verhältnis zu  $\tau_n$  zu bewerten. Im Unterschied zum Konzentrations-

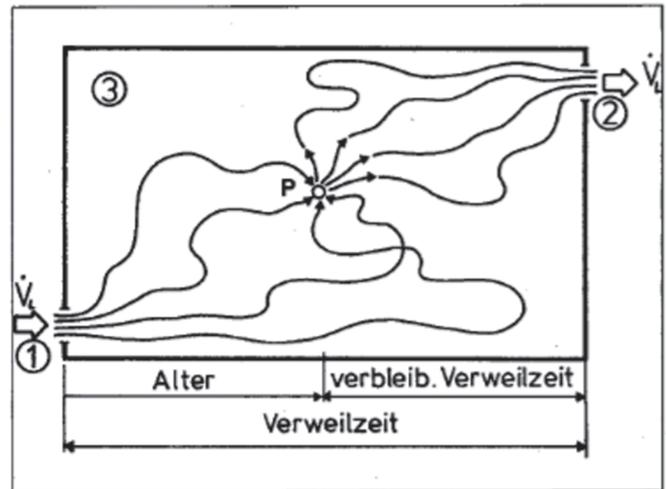


Bild 3. Strompfade von Luftmolekülen in einem Raum zum Punkt P [2].

abfall bei einer LWM, der – weil immer gut durchmischt – streng exponentiell verläuft, ist das bei unvollständiger Durchmischung nicht der Fall. Eine detaillierte Betrachtung findet sich in [2]. In Kap. 6.2.2 ist der Unterschied zwischen einer effektiven lokalen LWZ und dem lokalen Alter der Luft an einem Beispiel näher erläutert.

### 3 Tracergase

Tabelle 1 ist ein Auszug aus [5] und listet häufig verwendete Tracergase mit Hintergrundkonzentration, Messprinzip und Detektionsgrenze auf. Die Entscheidung zur Verwendung eines bestimmten Tracergases wird in der Praxis meist durch die zur Verfügung stehende Analysetechnik bedingt.

Im Folgenden werden die für die Praxis wichtigen Vor- und Nachteile der jeweiligen Tracergase aufgezeigt.

#### 3.1 Hexafluorbenzol ( $C_6F_6$ )

Hexafluorbenzol ist bei Umgebungsbedingungen flüssig und wird zur Messung einer durchschnittlichen LWZ (mehrere Tage und Wochen) über Diffusionsröhrchen kontinuierlich der Raumluft zugemischt. Mit Passivsammlern werden Langzeitproben genommen. Dieses Verfahren wurde in

Tabelle 1. Zusammenstellung der in der Praxis verwendeten Tracergase, Exzerpt aus [3]

Indikatorgas	Hintergrundvolumengehalte Vol.-Anteile	Nachweismethode	Messbereich Vol.-Anteile
Schwefelhexafluorid SF <sub>6</sub>	(0,85 – 1,5) · 10 <sup>-12</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gaschromatograph mit Elektroneneinfangdetektor oder Massenspektrometer</li> <li>Infrarot-Gasanalysator</li> <li>Photoakustikdetektor</li> </ul>	5 · 10 <sup>-12</sup> – 200 · 10 <sup>-9</sup>  1 · 10 <sup>-7</sup> – 100 · 10 <sup>-6</sup> 5 · 10 <sup>-9</sup> *)
Hexafluorbenzol C <sub>6</sub> F <sub>6</sub>	< 1 · 10 <sup>-12</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gaschromatograph mit Elektroneneinfangdetektor oder Massenspektrometer</li> </ul>	50 · 10 <sup>-12</sup> – 10 · 10 <sup>-9</sup>
Distickstoffmonoxid (Lachgas) N <sub>2</sub> O **)	315 · 10 <sup>-9</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrarot-Gasanalysator</li> <li>Photoakustikdetektor</li> </ul>	1 · 10 <sup>-6</sup> – 200 · 10 <sup>-6</sup> 50 · 10 <sup>-9</sup> *)
Kohlendioxid CO <sub>2</sub> ***)	360 · 10 <sup>-6</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrarot-Gasanalysator</li> <li>Photoakustikdetektor</li> </ul>	1 · 10 <sup>-6</sup> – 5000 · 10 <sup>-6</sup> 3 · 10 <sup>-6</sup> *)

Abschnitt 2.1 nicht vorgestellt und wird hier auch nicht weiter betrachtet.

### 3.2 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Der Außenluftgehalt von CO<sub>2</sub> liegt in Deutschland mittlerweile um 400 ppm, in Städten und stark belasteten Gebieten können auch Spitzenwerte über 700 ppm mit großen zeitlichen Schwankungen gemessen werden. Beim Einsatz von CO<sub>2</sub> als Tracergas sind Personen (Atmung) eine zusätzliche Quelle mit nach Alter und Aktivitätsgrad unterschiedlicher Emissionsrate. Der MAK-Wert<sup>1)</sup> (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) liegt bei 5 000 ppm.

#### Vorteile:

- Mit einem CO<sub>2</sub>-Analysator oder einem CO<sub>2</sub>-Sensor ist das Gas einfach und preiswert zu messen.
- Wenn der CO<sub>2</sub>-Anstieg z. B. während einer Unterrichtsstunde von einer Schulklasse erzeugt wird und diese anschließend den Raum verlässt, ist es eine einfache Möglichkeit, z. B. bei geschlossenen Fenstern die Infiltrationsrate des Klassenzimmers zu messen oder bei Fensterlüftung in Pausenstellung zu überprüfen, ob die Luft nach der Pause wieder ausreichend frisch ist.

#### Nachteile:

- Es steht nur eine Zehnerpotenz (von 5 000 ppm bis auf 500 ppm) zur Messung des Konzentrationsabfalls zur Verfügung.
- Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft und die in den Nebenräumen muss mitgemessen werden, wobei die Unsicherheit bleibt, wie viel die Außenluft oder die Nebenraumluft zum LW beigetragen hat.
- Personen sollten sich während der Messung nicht in den Räumen aufhalten. Falls sich dies nicht vermeiden lässt, muss deren CO<sub>2</sub>-Emission geschätzt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.
- Es ist weder praktikabel noch sinnvoll, CO<sub>2</sub> aus einer Gasflasche in einen Raum einströmen zu lassen, zum einen wegen der zuvor beschriebenen Unsicherheiten und zum anderen aufgrund der großen benötigten CO<sub>2</sub>-Mengen.

### 3.3 Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O)

Distickstoffmonoxid wird u. a. als Narkosegas eingesetzt. Es kommt nur in geringen Konzentrationen in der Außenluft vor. Der MAK-Wert liegt bei 100 ppm. Gemessen wird N<sub>2</sub>O mit einem Infrarotgasanalysator im Konzentrationsbereich zwischen 1 und 200 ppm.

Es gehört zu den ‚Best Practices‘, dass Innenraumluftkonzentrationen max. 1/20 des MAK-Wertes betragen sollten (hier also 5 ppm). Unter dieser Voraussetzung würde ein Faktor von lediglich 5 für die Verdünnung zur Verfügung stehen. Die Bewohner bei höheren Konzentrationen zum verlassen des Gebäudes aufzufordern, ist keine gute Alternative in der Praxis.

#### Vorteile:

- Keine.

#### Nachteile:

- In bewohnten Gebäuden gemäß [3] nicht verwendbar.
- Die Injektion eines Narkosegases in Räume wird immer zu Diskussionen mit den Bewohnern, mit dem Betriebs-

oder Personalrat in Bürogebäuden führen. Da es bessere Alternativen gibt, sollten diese genutzt werden.

- Die Querempfindlichkeit zu Wasserdampf macht eine Analyse aufwendig. Weiterhin neigt N<sub>2</sub>O zur Adsorption an Oberflächen (hohe Messunsicherheit). Da es stark wasserlöslich ist, ist eine LWM z. B. in einer Schwimmhalle nicht möglich.
- Verdünnungsfaktor sehr gering.

### 3.4 Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>)

Schwefelhexafluorid ist ein sehr stabiles Molekül, das in der Außenluft nur in Spuren vorkommt. Die Hintergrundkonzentration liegt bei 3 bis 4 ppt. Es kann über Infrarotanalytik bis in den unteren ppm-Bereich nachgewiesen werden, einige gute Analysatoren gehen auch in den ppb-Bereich. Gaschromatographisch können Konzentrationen bis zum Hintergrundlevel ohne Aufkonzentrierung direkt gemessen werden.

#### Vorteile:

- Nicht toxisch oder chemisch aktiv.
- Keine signifikante Hintergrundkonzentration.
- Keine Adsorption an Oberflächen.
- Keine Querempfindlichkeiten bei der gaschromatographischen Analyse, bei Infrarot-Analyse ist Einfluss zu prüfen.
- Bei der GC-Analytik werden nur sehr geringe Volumina benötigt.
- Wegen der geringen benötigten Mengen sehr preiswert.

#### Nachteile:

- Mit einem GWP<sup>2)</sup> von 22 800 ist es das klimaschädlichste Gas und trägt stark zur Erderwärmung bei.

### 3.5 Tracergase und ihr Einfluss auf die Umwelt

CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und SF<sub>6</sub> sind klimaschädliche Gase, die zur Erwärmung der Erdatmosphäre beitragen. Der Bewertungsfaktor ergibt sich aus dem GWP<sub>100</sub>-Kennwert. Hierbei wird das Gefährdungspotenzial von CO<sub>2</sub> definitionsgemäß gleich eins gesetzt; die Gefährdungspotenziale anderer Gase werden als ein Vielfaches des CO<sub>2</sub>-GWP<sub>100</sub>-Wertes ausgedrückt. Der Index 100 bezieht sich auf einen Zeitraum von 100 Jahren.

Um abzuschätzen, welches Tracergas für die Umwelt bei LWM am meisten schädigend ist, betrachtet man einen Raum mit 30 m<sup>2</sup> Fläche, 3 m Höhe und somit 90 m<sup>3</sup> Raumvolumen. **Tabelle 2** gibt für die zuvor beschriebenen Tracergase die unter Berücksichtigung der eingesetzten Analysetechnik benötigten Tracergasvolumina, die jeweiligen GWP<sub>100</sub>-Werte und auch das Gesamt-GWP, das Produkt aus der zu injizierenden Tracergasmasse und dem jeweiligen GWP<sub>100</sub>-Wert, an.

So sind bei CO<sub>2</sub> als Tracergas insgesamt 410 l zu injizieren. Mit einem CO<sub>2</sub>-GWP<sub>100</sub> = 1 beträgt das Gesamt-GWP = 739. Es steht für den Konzentrationsabfall aber nur ein Verdünnungsfaktor von maximal 11 zur Verfügung, was nur sehr eingeschränkte LWM möglich macht.

Bei N<sub>2</sub>O sind bis zum Erreichen des MAK-Werts von 100 ppm insgesamt 9 l zu injizieren und mit einem N<sub>2</sub>O-GWP<sub>100</sub> von 310 liegt das Gesamt-GWP siebenmal höher als bei CO<sub>2</sub>. Wendet man ‚Best Practices‘ an und injiziert nur bis 5 ppm, dann reduziert sich der Verdünnungsfaktor auf 5 und damit wird N<sub>2</sub>O nahezu unbrauchbar für LWM.

<sup>1)</sup> MAK - Maximale Arbeitsplatzkonzentration

<sup>2)</sup> GWP - Global Warming Potential, Treibhauspotenzial

SF<sub>6</sub> hat mit 22 800 den höchsten GWP<sub>100</sub>-Wert aller klimaschädlichen Gase [4]. Das erfordert einen äußerst sorgsam und sparsamen Umgang mit diesem Gas. Bei den drei Verfahren zur SF<sub>6</sub>-Analytik schneidet das IR-optische Verfahren am schlechtesten ab. Das Gesamt-GWP liegt beim 1665-fachen von CO<sub>2</sub> und der Verdünnungsfaktor liegt bei 100, was für nicht zu hohe LWZ ausreichend ist.

Die höhere Auflösung beim IR-photoakustischen Verfahren ermöglicht deutlich geringere Konzentrationen bei gleichzeitig höherer Verdünnungsmöglichkeit, führt aber immer noch zu dem 249-fachen Gesamt-GWP verglichen mit CO<sub>2</sub> als Tracergas.

Am umweltfreundlichsten ist die Anwendung von SF<sub>6</sub> mit GC-Analyse. Trotz des extrem hohen SF<sub>6</sub>-GWP<sub>100</sub>-Wertes beträgt das Gesamt-GWP nur 0,166 und liegt damit gegenüber CO<sub>2</sub> um einen Faktor 6 niedriger.

Dabei ist sogar ein Verdünnungsfaktor von 10<sup>5</sup> möglich. Würde man hier bei LWM, bei denen die LWZ vermutlich unter  $n = 5 \text{ h}^{-1}$  liegt, auf einen Verdünnungsfaktor von 10<sup>2</sup> heruntergehen, läge die Umweltbelastung durch SF<sub>6</sub> gegenüber CO<sub>2</sub> sogar um einen Faktor von 60 niedriger. Anders ausgedrückt heißt das, dass 60 LWM mit SF<sub>6</sub> und GC-Analytik den gleichen Umwelteinfluss haben wie eine einzige LWM mit injiziertem CO<sub>2</sub>.

Im Jahre 2017 wurden allein in Deutschland 976 Tonnen SF<sub>6</sub> produziert [5]. Multipliziert mit dem GWP-Faktor von SF<sub>6</sub> ergeben sich damit 22 Mio. GWP-gewichtete Tonnen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, von denen ein großer Anteil nicht wiedergewonnen werden kann und in die Atmosphäre strömt. Um Tracergasmessungen hierzu ins Verhältnis zu setzen, sei darauf hingewiesen, dass sich mit einer 10-l-Flasche SF<sub>6</sub> über 1,8 Mio. Luftwechsellmessungen für Räume mit 90 m<sup>3</sup> durchführen lassen. Ein einzelnes Messinstitut könnte es deshalb nie schaffen, für Luftwechsellmessungen eine 10-l-Flasche SF<sub>6</sub> bei Nutzung der GC-Analytik nach dem Stand der Technik aufzubrechen.

Insgesamt spielen Tracergasmessungen mit SF<sub>6</sub> in Bezug auf die Klimaschädigungen durch dieses Gas eine völlig untergeordnete Rolle. Deshalb ist die Verwendung von SF<sub>6</sub> für Tracergasmessungen in der EU auch nicht verboten.

### 3.6 Kosten einer Luftwechsellmessung

Tabelle 3 zeigt Preise von Tracergasen (Stand 2018, ohne MWSt). Für das Volumen der Gasflaschen wurde 10 l gewählt, weil größere Flaschen in der Praxis nur sehr schwer handhabbar sind. Es zeigt sich, dass SF<sub>6</sub> mit GC-Analysenverfahren die preiswerteste Methode ist.

## 4 Weitere Vor- und Nachteile bei Tracergasmessungen

### 4.1 Injektion

Vor Beginn einer Messung ist zu überschlagen, wie viel Tracergas zu injizieren ist. Das hängt ab von dem gewählten

Tabelle 2. GWP einzelner Tracergase und ihr tatsächlicher Beitrag zur Erderwärmung bei verschiedenen Analysemethoden.

Tracergas	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	SF <sub>6</sub> _IR-opt.	SF <sub>6</sub> _IR-PA	SF <sub>6</sub> _GC
C_CO2_Umgebung in ppm	450	0	0	0	0
C_max in ppm	5000	100	100	15	0,010
V_Tracer_injekt in l	410	9,0	9,0	1,35	0,00090
m_Tracer_injekt in g	739	16	54	8	0,00539
MAK-Wert in ppm	5 000	100	1 000	1 000	1 000
untere Detektionsgrenze in ppm	450	1	1,0	0,015	0,000010
GWP100	1	310	22 800	22 800	22 800
Gesamt GWP	739	5 037	1 229 177	184 377	123
<b>GWP_CO2/GWP_Tracer</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1 667</b>	<b>249</b>	<b>0,166</b>
Faktor für Konzentrationsabfall	11	100	100	1 000	1 000

Tabelle 3. Berechnung des Gaspreises für eine Luftwechsellmessung für verschiedene Tracergase.

Tracergas	Preis einer 10-l-Gasflasche in €	Inhalt in kg	Inhalt in l	Menge für eine LWM in l	Gaspreis einer LWM in €
CO <sub>2</sub>	44	7,5	4058	410	4,49
N <sub>2</sub> O	230	7,5	4050	9,0	0,51
SF <sub>6</sub> -IR-opt.	466	10,4	1 686	9,0	2,49
SF <sub>6</sub> -IR-PA	466	10,4	1 686	1,35	0,37
SF <sub>6</sub> -GC	466	10,4	1 686	0,00090	0,00025

Analysenverfahren und dessen Messbereich, der Größe des Raumes und der zu erwartenden LWZ. Arbeitet man bei CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O im ppm-Bereich, so sind große Volumina erforderlich. Bei kleinen Räumen kann es ausreichen, aus einer Gasflasche einen Beutel abzufüllen. Für einen Raum von 90 m<sup>3</sup> bräuchte man beispielsweise 410 l CO<sub>2</sub>, um die Konzentration von 450 ppm auf 5 000 ppm ansteigen zu lassen. Das erfordert einen recht unhandlichen Beutel für den Transport zum Objekt. Bei Befüllung vor Ort müsste eine Gasflasche mitgenommen werden. Bei N<sub>2</sub>O und einer Anfangskonzentration von 100 ppm wäre ein Beutel mit 9 l deutlich besser handhabbar.

Häufig sind Räume deutlich größer als 90 m<sup>3</sup>, sodass Injektionsbeutel wenig praktikabel sind. In diesen Fällen ist eine Gasflasche und ein Volumenstrommessgerät notwendig, um die erforderliche Menge an Tracergas injizieren zu können. Hier ist dann noch für die Verteilung des Gases im gesamten Raum zu sorgen. Eine 10-l-Gasflasche ist nur mühsam zu bewegen. Häufig werden zusätzlich Lüfter eingesetzt, was in großen und hohen Räumen aber auch an praktische Grenzen stößt.

### 4.2 Analytik

#### 4.2.1 IR-Spektroskopie

IR-Analysatoren ziehen über einen Schlauch Probenluft an und messen die Konzentration. Verfahren mit Vergleichsküvette benötigen relativ viel Probenluft (einige Liter) und geben ein kontinuierliches Signal. Das photoakustische Verfahren kommt mit 200 ml zum Spülen der 40-ml-Messgaszelle aus und ermöglicht Proben in 1- bis 2-Minuten-Intervallen.

Proben an mehreren Stellen im Raum zu nehmen ist nur möglich, indem ein Multiplexer vorgeschaltet und Schläuche an die Messstellen verlegt werden. Einerseits ist ein großer Messgeräteaufwand zu treiben, die Verlegung von Schläuchen ist zeitintensiv und in belegten Räumen häufig



Bild 4. Spritzenbasett zur Messung des Luftwechsels bestehend aus einer mit SF<sub>6</sub> gefüllten Injektionsspritze (links) und fünf leeren Spritzen zur Probenahme. Bild: TracerTech



Bild 5. Injektion und Probenahme in großen Höhen mittels Teleskopstange.



Bild: Büro Dr. Berling.

ein Problem. Komplexe Messungen mit mehreren Messstellen mit IR-Analysatoren sind deshalb aufwendig und kostenintensiv.

#### 4.2.2 Gaschromatographie und Spritzenmethode

Ein SF<sub>6</sub>-GC mit Electron Capture Detector (ECD) arbeitet im ppt- bis ppb-Bereich, d. h., dass ein um einen Faktor 1 000 bis 10 000 geringeres Volumen an Tracergas injiziert werden muss. Bei dem Beispielraum von 90 m<sup>3</sup> müssten nur 0,9 ml SF<sub>6</sub> injiziert werden, um auf eine Anfangskonzentration von 10 ppb zu kommen, und man könnte zur Ermittlung auch großer LWZ bis herab zu 10 ppt analysieren – das entspricht einem Verdünnungsfaktor von 10<sup>5</sup>.

Die geringen SF<sub>6</sub>-Mengen ermöglichen es, ohne Gasflaschenhandlung und unhandliche Probenahmebeutel das SF<sub>6</sub> auf einfache Weise mit 60-ml-Spritzen auszubringen. Mit einer einzigen mit SF<sub>6</sub> gefüllten Spritze lässt sich die LWZ in einem Raum von 3 000 m<sup>3</sup> messen. Das Messset hierzu zeigt Bild 4. Ist der Raum größer, setzt man entsprechend mehr Spritzen ein. In der Praxis wurden LWM mit Spritzeninjektion in Hallen von bis zu 70 000 m<sup>3</sup> mit hoher Genauigkeit für Infiltrationsmessungen durchgeführt. Die Spritzen haben überdies den Vorteil, dass man das Gas bei Durchschreiten des Raumes gleichmäßig verteilen kann. Die Durchmischung wird dadurch erheblich vereinfacht, insbesondere bei großen Räumen.

Zur Auswertung einer Probe mit dem GC werden in der Praxis 10 ml Probenluft verwendet. Eine 60-ml-Probe lässt sich somit 6-mal hintereinander analysieren. Sollte eine Probe einmal über der messbaren Maximalkonzentration oder oberhalb des Kalibrierbereichs liegen, so lässt sich der Spritzeninhalt leicht verdünnen. Ein weiterer Vorteil ist es, ohne aufwendige Schlauchverlegung an mehreren Stellen im Raum einfach und schnell Proben nehmen zu können. Weiterhin ist es möglich, Raumdurchschnittsproben zu nehmen, indem man die Spritze langsam aufzieht, während

man durch den Raum geht. D. h., selbst wenn die Raumluft nicht gut gemischt werden kann oder man sie auch nicht durchmischen will (siehe lokales Alter der Luft), ist man dennoch recht nahe an einer mittleren Raumkonzentration. Mit der Spritzenmethode lassen sich bequem von einer Person in zehn Räumen gleichzeitig LWM durchführen. Die Trennung von Probenahme und Analyse ermöglicht es dem Sachverständigen, sich auf die Probenahme zu beschränken und die Analyse an ein Auftragslabor zu vergeben.

Bei sehr hohen Räumen bietet die Spritzenmethode eine einfache Möglichkeit auch ohne Pumpe. Man befestigt einen 3-mm-Polyethylen-Schlauch an einer Teleskopstange, zieht einmal die Spritze zur Schlauchspülung auf und dann erneut für die Probe auf. Genauso lässt sich auch bei der Injektion das Tracergas in allen Höhen einer Halle leicht verteilen oder man benutzt eine Teleskopvorrichtung mit akkubetriebenen Pumpen (siehe Bild 5).

Möchte man mehrere LWZ bei unterschiedlichen Lüftungsbedingungen messen (z. B. geschlossene Fenster und Türen, danach ein Fensterflügel in Kippstellung oder geschlossene Fenster und Türen, danach angeschaltete Lüftungsanlage), so reicht bei SF<sub>6</sub> meist eine Injektion. Danach nimmt man fünf Proben für den ersten Lüftungszustand und weitere fünf beim zweiten Lüftungszustand.

## 5 Bewertung der Tracergasverfahren

Tracergasmessungen müssen für die Praxis wirtschaftlich und genau sein. Wirtschaftlich bedeutet

- geringe Geräteinvestition
- keine laufenden Kosten (Wartung, Kalibrierung)
- geringer Aufwand für Vorbereitungen (Gasflaschentransport, Pumpen, Multiplexer, Schlauchverlegung)
- einfache lokale und integrale Probenahmen
- kostengünstige Analytik

Alle Kriterien werden am besten von der SF<sub>6</sub>-Spritzenmethode erfüllt. Die Kosten für eine Einzelmessung sind gering und nehmen bei steigender Anzahl entsprechend ab. Das Spritzenverfahren ist seit 1980 in [6] standardisiert und auch in [3] übernommen.

<sup>3)</sup> ECD - Electron Capture Detector

## 6 Tracergasverfahren bei Innenraumluftuntersuchungen

Bei Innenraumluftuntersuchungen bietet sich eine Tracergasmessung an, um mehr über den Lufttransport von Schadgasen zu erfahren und deren Emissionsraten zu bestimmen. Schadstoffe wie Stäube, Fasern und Mikroben haben jedoch meist eine eigene Ausbreitungs- und Absetzungscharakteristik; sie werden zwar durch die Luftströmung getragen, verhalten sich aber häufig anders als die Luft. Hier sind Tracergasmessungen unter Umständen nicht geeignet.

Luftverunreinigungsquellen in Innenräumen haben häufig Flächencharakter, z. B. Farbanstriche von Wänden, Kleber in Fußböden, Möbel und Bodenbeläge. Oft müssen zuerst die Schadgase identifiziert werden, um auf die Quelle schließen zu können.

Daneben gibt es Punktquellen wie Öfen, Herde, Zigaretten. Hier sind Quelle und Emissionsstoffe meist bekannt.

### 6.1 VOC und Geruchsmessungen

Häufig sind es Flächenquellen (Teppiche, Bodenbeläge, etc.) oder Linienquellen (z. B. Kleber, die über Boden/Wandfugen ausgasen), die zu überhöhten Raumkonzentrationen führen. Die Quellstärke kann temperaturabhängig sein. Insbesondere bei Formaldehyd kann auch die Raumluftfeuchte einen Einfluss haben. Flächenquellen sind diffuse Quellen, die keine eigene Ausbreitungsdynamik (Impuls) haben. Die Verteilung und Vermischung erfolgt über die konvektiven Luftströmungen innerhalb des Raumes. Konzentrationsgradienten können nur auftreten, wenn sich das Strömungsmuster stark von einer Mischlüftung unterscheidet.

Führt man parallel zur VOC-Messung eine LWM durch, lässt sich die Quellstärke  $Q$  gemäß [4] über Gl. (5) bestimmen.

$$Q = c^{\infty} \cdot n \cdot V_R \quad (5)$$

Die Raumluftkonzentration ist umgekehrt proportional zur LWZ, d. h. eine Änderung der LWZ von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  auf  $0,2 \text{ h}^{-1}$  halbiert die VOC-Konzentration. Ohne Kenntnis der LWZ hat es also wenig Sinn, großen Wert auf die Genauigkeit der VOC-Analyse zu legen.

Innenraummessungen sollten unter realen Nutzungsbedingungen durchgeführt werden. Unabhängig davon, ob Fenster und Türen geschlossen oder geöffnet sind, ist es bei der LWM notwendig, während der gesamten Messzeit das Tracergas gut durchmischt zu halten. Bei Gutachten ist die Güte der Durchmischung über Punktmessungen zu Beginn und am Ende über lokale Proben quantitativ nachzuweisen [6].

### 6.2 Praxisbeispiele

Die nachfolgenden Beispiele sollen nicht beweisen, dass Tracergasmessungen unbedingt notwendig sind oder automatisch Lösungen ergeben, sie sollen aber aufzeigen, welche zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden können. Der Sachverstand des Gutachters ist bei allen Fragestellungen zur Luftqualität gefordert.

#### 6.2.1 Schlechte Luft und Gerüche in einem Schulraum

- Das Erdgeschoss eines mehrstöckigen Hauses einer deutschen Großstadt ist an eine Sprachschule vermietet. In den

Räumen findet tagsüber Unterricht statt. Der Mieter klagt über schlechte Luft und Gerüche. Ein Messinstitut führt eine Analyse auf 127 Schadgase durch, von denen dann 71 in der Raumluft nachgewiesen werden. Vor der Messung wurde gelüftet und 8 h bis zur Messung gewartet. Die gemessene TOC-Konzentration von  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zeigt eine leicht erhöhte Gesamtbelastung gegenüber dem Orientierungswert von  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf. Vier der 71 gemessenen VOC sind auffällig. Eine LWM wird nicht durchgeführt.

- Das Institut empfiehlt, weitere Messungen bei typischem Nutzerverhalten (also ohne 8 h geschlossene Fenster und Türen) durchzuführen, um zu prüfen, ob dann der TOC-Orientierungswert dauerhaft unterschritten wird. Aufgrund der geringen Überhöhungen suchte der Besitzer stattdessen nach einer preiswerten, aber sicheren Lösung.

- Folgende einfache Lösung wurde konzipiert:

- Eine LWM bei geschlossenen Fenstern und Türen ergab  $n = 0,34 \text{ h}^{-1} \pm 0,02$ . Da die Wetterbedingungen ähnlich wie bei der früheren VOC-Messung waren, wird angenommen, dass der LW ähnlich wie am VOC-Messtag ist.

- Sollte tatsächlich, was aus dem Untersuchungsbericht nicht explizit hervorging, nur genau 8 h nach der Lüftung bis zur Messung gewartet worden sein, so lagen die Konzentrationen erst bei 93 % der Gleichgewichtskonzentration. Die realen VOC-Konzentrationen wären damit geringfügig höher als die gemessenen.

- An den Schulungsraum grenzte ein WC mit einem passiven Abluftschacht. Hier wurde ein Lüfter eingebaut, der dauerhaft oder mit Schalluhr betrieben werden kann.

- Zur Kontrolle wurde eine LW-Kombimessung im Schulraum durchgeführt, d. h. es wurde einmal injiziert und mit den ersten fünf Proben die LWZ  $n_1$  bei geschlossener WC-Tür und anschließend über weitere fünf Proben der LW  $n_2$  bei geöffneter WC-Tür und jeweils laufendem Lüfter gemessen. Die Auswertung der Spritzen ergab  $n_1 = 0,65 \pm 0,04 \text{ h}^{-1}$  und  $n_2 = 0,79 \pm 0,03 \text{ h}^{-1}$ .

- Der LW hatte sich somit durch den Lüfter verdoppelt und die Raumkonzentrationen halbiert. Der Unterschied zwischen geöffneter und geschlossener WC-Tür war gering. Somit konnte die Tür auch ohne zusätzliche Nachströmöffnungen geschlossen bleiben.

- Um Energie zu sparen, konnte man den Lüfter abschalten. Über die Kenntnis der LWZ konnte dem Besitzer empfohlen werden, 6 bis 7 h vor Beginn des Unterrichts den Lüfter anlaufen zu lassen. Nach dieser Zeit ist ein Minimum an Belastung erreicht.

#### 6.2.2 Schlecht durchlüftete Raumbereiche

Ein Mieter entdeckt Schimmelpilze hinter einer Schrankwand und weist den Vermieter darauf hin, dass seine Wohnung feucht sei. Dieser dagegen vermutet eine zu geringe Lüftung seitens des Mieters. Zur Erklärung soll das Beispiel aus Abschnitt 2.5 dienen.

Eine LWM bei geschlossenen Fenstern und Türen ist hilfreich, um zunächst eine Klassifizierung der Gebäudedichtigkeit vornehmen zu können. Man erhält also die Infiltrationsrate in den Raum. Wird nun gelüftet, z. B. über einen Fensterflügel in Kippstellung, würde man eine höhere LWZ messen. Diese Information ist hilfreich, aber die eigentliche Fragestellung ist, ob bzw. wie viel von der frischen Luft auch an der befallenen Wand ankommt und Bauteilfeuchte abtransportieren kann. Eine Tracergasmessung hierzu würde folgendermaßen ablaufen:

Tabelle 4. Randbedingungen und Messergebnisse in einem Schlafzimmer, die Raumproben wurden integral genommen, die Proben hinter dem Schrank sind an einer Stelle genommen.

Auswertung Luftwechsellmessung (Kombi-Set)				
Messobjekt	Schlafzimmer Fewo			
Beheizte Wohnfläche:	12 m <sup>2</sup>	Injektionsmenge Tracergas:	65 ml	
Zonenvolumen:	32 m <sup>3</sup>	Konzentration des Inj.gases:	1,00E+04 ppm	
Raumtemperatur:	17,0 °C	Injektionsdatum:	28.01.2018	
Außentemperatur:	8 °C	Injektion um:	14:55:00 Fenster, Türe geschlossen	
Wind:	null	Änderung der Lüftungsbedingungen:	14:56:00 Fenster auf Kipp	

Nr.	Zeit	t <sub>rel</sub>	Konzentration in ppb	Bemerkung
1	14:55:00	00:00:00	22,4	hinter Schrank
2	14:59:00	00:04:00	20,4	"
3	15:05:00	00:10:00	17,6	"
4	15:10:00	00:15:00	15,6	"
5	15:16:00	00:21:00	13,2	"
6	15:29:00	00:34:00	9,56	"
7	15:44:00	00:49:00	7,13	"
8	16:47:00	01:52:00	1,75	"
9	17:35:00	02:40:00	0,637	"
10	19:17:00	04:22:00	0,071	"
11	14:55:00	00:00:00	22,1	Raum
12	15:00:00	00:05:00	16,9	"
13	15:06:00	00:11:00	14,2	"
14	15:11:30	00:16:30	12,4	"
15	15:17:00	00:22:00	10,7	"
16	15:30:00	00:35:00	7,63	"
17	15:45:00	00:50:00	5,37	"
18	16:46:00	01:51:00	1,43	"
19	17:06:00	02:11:00	0,983	"
20	19:17:00	04:22:00	0,053	"

Raum auf die Spritzen gezogen, sodass man Durchschnittskonzentrationen für die LWZ bei gekipptem Fenster erhält. Durch die Probenahme über den Schlauch erhält man eine Aussage über die Lüftungssituation im Zwischenraum hinter dem Schrank. Auf gleiche Weise ließen sich mögliche Verbesserungen nachprüfen.

Bild 6 zeigt, dass die Anfangskonzentrationen mit 22,1 ppb im Raum und 22,4 ppb hinter dem Schrank nahezu gleich sind, d. h. die Voraussetzungen einer einheitlichen Anfangskonzentration sind erfüllt. Es ist zu erkennen, dass die Konzentration im Raum anfangs

- Man bereitet zwei Spritzensets mit jeweils fünf oder mehr Probenahmespritzen vor. Mit den ersten fünf Proben bestimmt man den LW im Raum. Das zweite Set dient zur Messung eines lokalen Luftaustausches hinter dem Schrank. Vorbereitend wird ein kurzes Schlauchstück vom Zentrum des Schimmelbefalls hinter dem Schrank an die Vorderwand des Schrankes zwecks einfacher Probenahme geführt, siehe Bild 2, rechts.
- Dann wird das Tracergas bei geschlossenem Fenster mit der Injektionspritze gleichmäßig im Raum verteilt und durch intensives Wedeln dafür gesorgt, dass die Anfangskonzentration des Tracergases zwischen Wand und Schrank die gleiche wie im Raum selbst ist.
- Nach der ersten Probenahme wird das Fenster in Kippstellung gebracht.
- Im Unterschied zur LWM, bei der das Tracergas während der gesamten Messzeit aktiv vermischt werden muss, wird der Raum nach der ersten Probenahme sich selbst überlassen. Die Raumluftproben werden beim Umhergehen im

stärker abfällt. Bild 7 zeigt die Regressionsgeraden beider Messungen im logarithmischen Maßstab.

Berechnet man nun die lokalen Alter der Luft für beide Fälle, so ergibt sich

$$\tau_{p\text{"hinterer_Schrank"}} = 0,76 \text{ h bzw. } n_{\text{eff,lokal_\"hinter_Schrank\"}} = 1,32 \text{ h}^{-1}$$

$$\tau_{p\text{"Raum"}} = 0,63 \text{ h bzw. } n_{\text{eff,lokal_\"Raum\"}} = 1,59 \text{ h}^{-1}$$

Die Unterschiede zwischen der LW-Berechnung und Alterder-Luft-Berechnung lassen sich wie folgt begründen: Bei der Berechnung der LWZ (1,32 h<sup>-1</sup> und 1,35 h<sup>-1</sup>) wird durch alle Punkte eine Gerade gelegt, egal, ob die Punkteschar wirklich einer Geraden nahekommt. Bei der Berechnung des Alters der Luft wird dem tatsächlichen Kurvenverlauf Rechnung getragen. Da die LWZ-Regression den anfangs nicht linearen Abfall genauso wichtet wie alle späteren Konzentrationen, liegen beide LWZ recht nahe bei einander und sind fast identisch. Die Realität wird aber besser durch die lokalen Alter beschrieben und da beträgt die Differenz

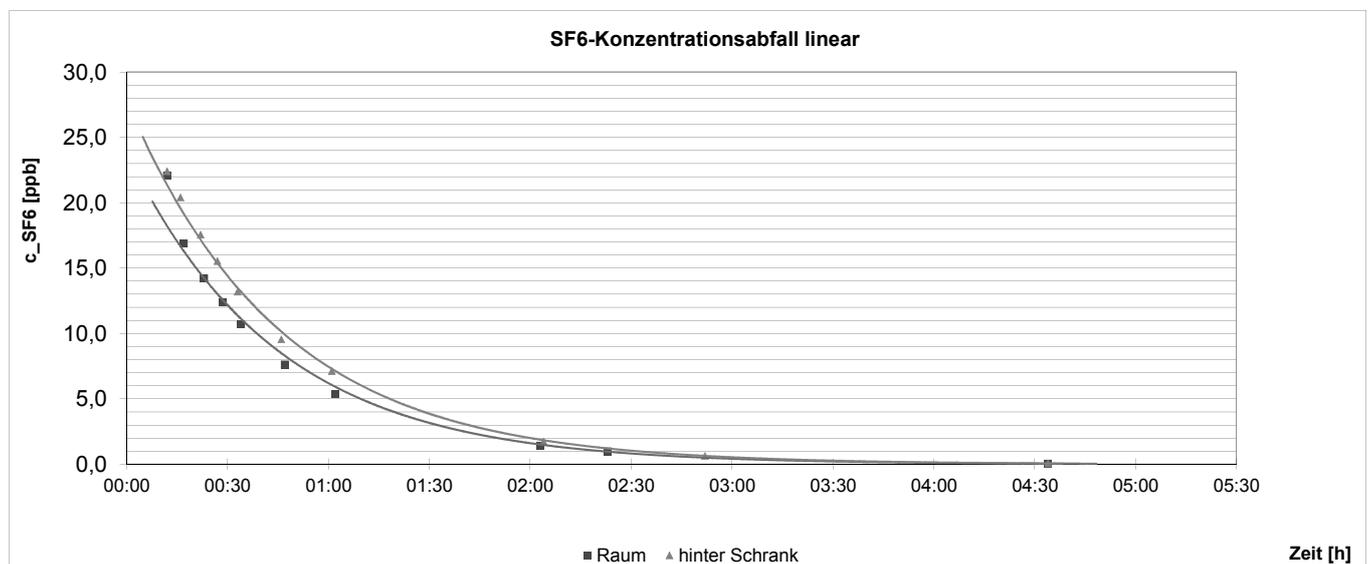


Bild 6. SF<sub>6</sub>-Konzentrationsabfall der Raumkonzentration und der Konzentration hinter dem Schrank mit linearer Konzentrationsachse.

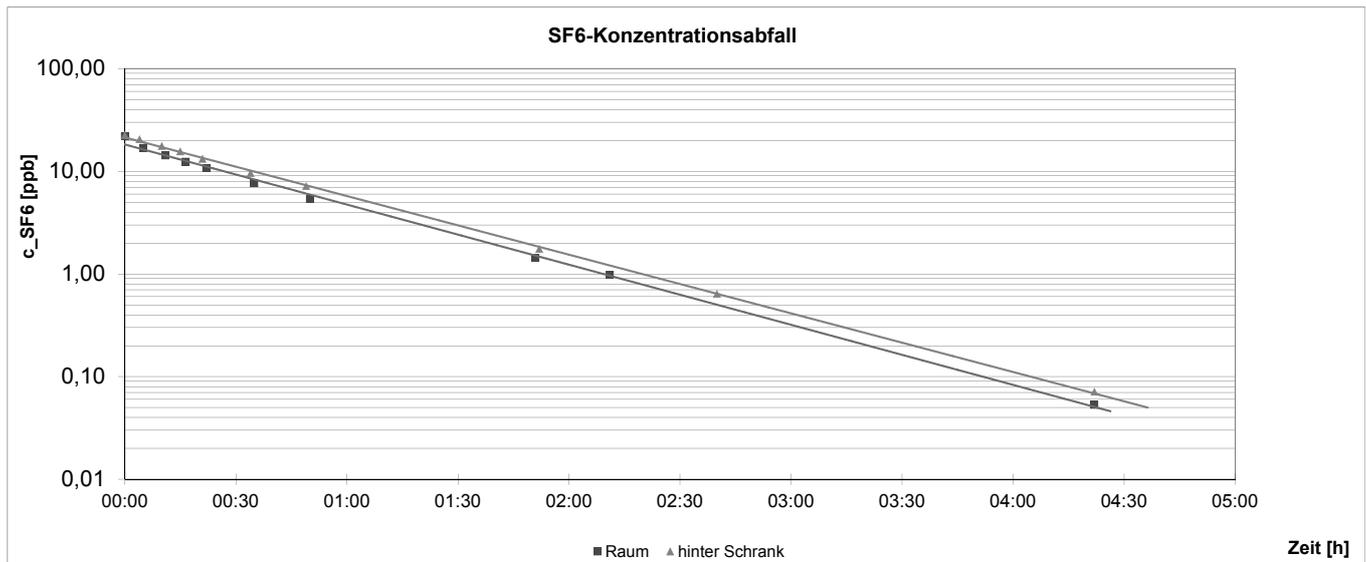


Bild 7. SF<sub>6</sub>-Konzentrationsabfall der Raumkonzentration und der Konzentration hinter dem Schrank mit logarithmischer Konzentrationsachse.

zwischen beiden Ergebnissen ( $1,32 \text{ h}^{-1}$  und  $1,59 \text{ h}^{-1}$ ) 17 % (Bild 8). Vom Fachmann ist nun zu bewerten, ob mangelnde Belüftung für den Schimmel ursächlich sein könnte und ob ein Wegrücken des Schrankes oder aber andere Maßnahmen sinnvoll sind, um die Vermeidung des Schimmels zu erreichen.

### 6.2.3 Luftqualität in der Aufenthaltszone

Bei Arbeitsplatzmessungen geht es häufig um die Luftqualität in der Aufenthaltszone.

Bild 9 zeigt schematisch eine Produktionshalle, die maschinell belüftet wird. Infiltrationseinflüsse seien hier vernachlässigt. Es sei zudem angenommen, dass für die Halle ein Luftwechsel von  $3 \text{ h}^{-1}$  vorgeschrieben ist. Die Volumstrommessung im Zuluftkanal weist einen Volumenstrom von  $6000 \text{ m}^3/\text{h}$  aus. Da die Halle ein Volumen von  $2000 \text{ m}^3$  hat, ist der Nachweis erbracht, dass die Lüftung den Anforderungen entspricht. Die Frage ist, ob die Frischluft auch

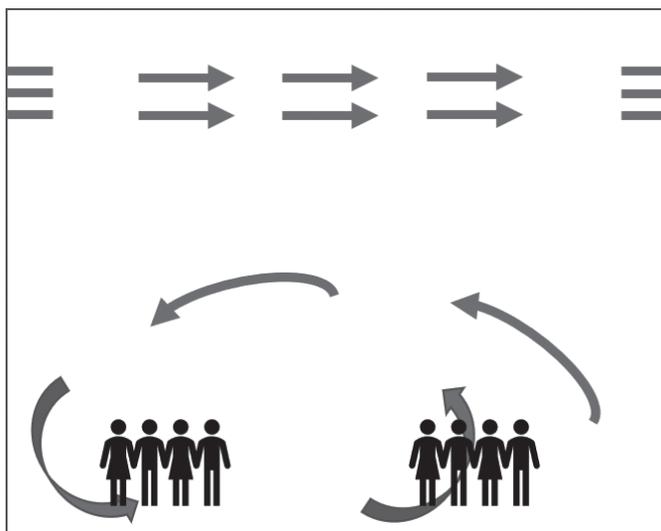


Bild 9. Ausgebildete Kurzschlussströmung in einer Produktionshalle.

### Messergebnis:

Luftwechsel "hinter Schrank" =	$1,32 \text{ h}^{-1}$	+/- 0,040
Luftwechsel "Raum" =	$1,35 \text{ h}^{-1}$	+/- 0,088

Bild 8. Ergebnis der Tracergasmessung, gerechnet mit einem exponentiellen Abfall.

tatsächlich im Aufenthaltsbereich der Arbeitenden ankommt oder ggf. im Kurzschluss wieder abgesaugt wird. Zur Klärung dieser Frage kann in der Aufenthaltszone eine effektive lokale LWZ oder besser das lokale Alter der Luft bestimmt und mit der aus Zuluft und Raumvolumen berechneten LWZ verglichen werden. Sofern das Abklingverfahren angewendet werden kann, ist zunächst das Tracergas vollständig im Raum zu vermischen. Anschließend wird an mehreren Stellen in der Aufenthaltszone der Konzentrationsabfall gemessen.

In großen Hallen ist es häufig praktikabler, die Step-up-Methodik anzuwenden, die zudem den Vorteil hat, dass das vorherrschende Strömungsmuster nicht durch die Anfangsdurchmischung gestört wird. Es wird ein konstanter Tracergasvolumenstrom in den Zuluftkanal injiziert. Zur Kontrolle werden einige Proben stromabwärts der Injektionsstelle, aber noch im Zuluftkanal, entnommen, um zu überprüfen, ob der Zuluftvolumenstrom auch tatsächlich dem angegebenen Wert entspricht. Dann werden wie bei der Abklingmethode an mehreren Stellen in der Aufenthaltszone lokale oder integrale Proben genommen.

Wenn der Anstieg streng exponentiell wie in Bild 1 ist, dann liegt eine klassische Mischlüftung vor. Wenn der Anstieg anfangs steiler ist, wird dieser Bereich besser durchlüftet. Steigt er anfangs langsamer an, wird die Aufenthaltszone benachteiligt durchlüftet. Hier wird wiederum das Konzept vom Alter der Luft benötigt, um eine quantitative Bewertung der Aufenthaltszonendurchlüftung durchzuführen (siehe [2]).

Weitere Tracergasanwendungen im Gebäudebereich sind in [7] beschrieben.

**Abkürzungen**

GC	Gaschromatographie
LW	Luftwechsel
LWM	Luftwechselformel
LWZ	Luftwechselzahl
VOC	Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Substanzen
IR-opt	Infrarot Optisches Verfahren
IR-PA	Infrarot Photoakustisches Verfahren

**Formelzeichen**

$c^\infty$	Tracergaskonzentration nach unendlich langer Zeit, Gleichgewichtskonzentration
$c_p^0$	Tracergaskonzentration am Punkt $p$ zum Zeitpunkt $t=0$
$n$	Luftwechselzahl
$Q$	Quellstärke
$V_R$	Raumvolumen

**Literatur**

- [1] ISO 16000. Indoor air – Part 5: Sampling strategy for VOC, 2007.
- [2] Raatschen, W.: Was ist Lüftungseffektivität? KI – Klima, Kälte, Heizung 16 (1988) Nr. 5, S. 226-231; Nr. 6, S. 291-296; Nr. 7/8, S. 331-334.
- [3] VDI 4300, Blatt 7. Messung von Innenraumluftverunreinigungen, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Berlin: Beuth 2001.
- [4] Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2014.
- [5] Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe „Schwefelhexafluorid“ ( $SF_6$ ) und Stickstofftrifluorid ( $NF_3$ ). Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2017.
- [6] ASTM741.-11: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution 2011.
- [7] Raatschen, W.: Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. gi – Gesundheits-Ingenieur 116 (1995) Nr. 2, S. 78-87 und Nr. 3, S.129-135.