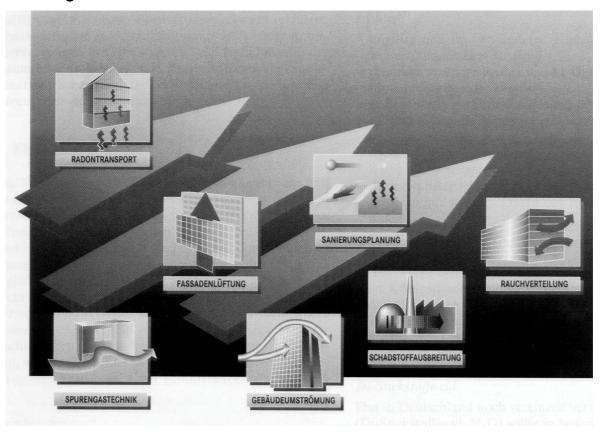


Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik

Dr.-Ing. Willigert Raatschen

Luftaustausch – Messung und Simulation



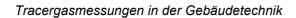


Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik

Dr.-Ing. Willigert Raatschen, TRACERTECH GMBH, Immenstaad

INHALT

1	1 ZUSAMMENFASSUNG	SSUNG4	
2	2 EINLEITUNG	4	
•	2 DIE WALL DECEDACED CAGES		
3	3 DIE WAHL DES TRACERGASES	4	
4	4 DIE TRACERGASMEßAUSRÜSTUNG	7	
	4.1 Anspruchsvollere Tracergasmessungen	7	
	4.2 MÖGLICHKEITEN DER TRACERINJEKTION	8	
	4.2.1 Plastikspritzen	8	
	4.2.2 Durchflußmesser	8	
	4.2.3 Automatisches Dosieren mit Drosseln und Ventilen	9	
	4.3 MÖGLICHKEITEN DER PROBENNAHME	9	
	4.3.1 Plastikspritzen	9	
	4.3.2 Probenahmebeutel		
	4.3.3 Probenahme über Schläuche	11	
	4.4 Tracergasanalyse mit dem Autotrac 101	12	
5	5 ADSORPTIONSPROBLEMATIK	12	
6	6 VOLUMENSTROMMESSUNG MIT TRACERGASEN	13	
7	7 BESTIMMUNG DER LÜFTERLEISTUNG EINES RAUMABLUFTGERÄTES I EINGEBAUTEN ZUSTAND		
ЕJ	EINGEBAUTEN ZUSTAND	15	
8	8 EFFIZIENZ EINER LÜFTUNGSANLAGE IM GEBÄUDE	17	
	8.1 BESTIMMUNG DES FRISCHLUFTANTEILS BEI UMLUFTBETRIEB	17	
	8.2 BESTIMMUNG DES LECKAGEANTEILS BEI (REKUPERATIVEN) WÄRMEAUSTAUSCHERN	18	
	8.3 WIEDEREINTRITT VON FORTLUFT INS GEBÄUDE	18	
9	9 EINTRITT VON ABGASEN INS GEBÄUDE	19	





10	RISIKOABSCHÄTZUNG EINES SCHADGASAUSTRITTS	20
11	WIRKSAMKEIT VON ABZUGSHAUBEN	21
12	DICHTHEIT VON LÜFTUNGSKANÄLEN	23
13	LECKAGE ZU SICHERHEITSBEREICHEN	24
14	'SAFE HAVEN' UND 'TEMPORARY SAFE HAVEN'	25
15 D ä i	DICHTIGKEIT VON LAGERSTÄTTEN GEFÄHRLICHER GÜTER ODER BELASTETER	26
NΑ		20
16	TEST VON NOTLÜFTUNGSSYSTEMEN	28
17	POSITIONIERUNG VON GASWARNSENSOREN UND IDENTIFIKATION SICHERER	
FLU	JCHTWEGE	28
18	SUCHE NACH EINER SCHADGASQUELLE	30
19	BESTIMMUNG DER QUELLSTÄRKE EINES SCHADGASES	30
20	EINBAUÜBERPRÜFUNG VON ADSORPTIONSFILTERN AUF SITZDICHTIGKEIT	31
21	ÜBERPRÜFUNG DER KEIMAUSBREITUNG IN KRANKENHÄUSERN MIT TRACERGASEN	N32
22	DISKUSSION	34
23	LITERATUR	35

TGmess_gesamt9.doc; 17.09.2002 Seite 3 von 36



1 Zusammenfassung

Der Bericht gibt einen Gesamtüberblick über Anwendungen von Tracergasmethoden im Bereich der Gebäudetechnik, wobei speziell auf die Vorteile und die Möglichkeiten der Tracergasanalyse über Gaschromatograph mit Electron Capture Detector eingegangen wird. Die beschriebenen Methoden beschränken sich nicht nur auf die Quantifizierung von Luft- und Schadstoffströmungen innerhalb eines Gebäudes, sondern beziehen auch den Transport von der Außenluft in und aus dem Gebäude mit ein. Der erste Teil führt in die Tracergastechnik ein und beschreibt insbesondere einfache in der Praxis anwendbare Verfahren. Auf eine ausführliche Abhandlung zum Thema Luftwechselmessungen wurde in diesem Bericht verzichtet. Detailinformationen sind als Download *Alles zum Thema Luftwechselmessungen* unter www.tracertech.de nachzulesen.

Es werden Verfahren zur Volumenstrommessung, zur Bewertung von Lüftungsanlagen und Abzugshauben sowie zur Messung des Wiedereintritts von Ab- bzw. Fortluft ins Gebäude erläutert. Tracergasverfahren zur Quantifizierung von Schadgastransportvorgängen in Gebäuden und die Beeinflussung der Raumluft durch belastende Außenluftzustände (Smogsituation, Schadgaswolke) durch den *Temporary safe haven Test* werden ebenso vorgestellt.

2 Einleitung

Die Verwendung von Tracergasen zur qualitativen und quantitativen Bewertung von Luftströmen hat eine lange Tradition. Die Bereiche, in denen die Tracertechnik Einzug hält, werden immer vielfältiger. Sicherlich war im Gebäudebereich wegen intensiver öffentlich geförderter Forschungsvorhaben in der Vergangenheit ein großer Schwerpunkt von Anwendungen; einen wirklichen Durchbruch bei alltäglichen praktischen Arbeiten gibt es allerdings seit 1995, seitdem die TracerTech GmbH ergänzend zur traditionellen, aufwendigen und kostenintensiven Infrarotanalysetechnik wesentlich preiswertere und praktikablere Alternativen anbietet, welche zu einer stark erweiterten Anwendung von Tracergasmethoden geführt haben. Neben dem schon erwähnten Bereich der Gebäudetechnik wird der Einsatz von Tracergasen in Bergwerken, bei der Endlagerung von radioaktivem Abfall, bei der Dichtheit von Kavernen, bei der Ölexploration (Verbindung von Bohrlöchern), bei der Ausbreitung von Schadgasen aus Schornsteinen, Mülldeponien oder Chemieanlagen in der Atmosphäre und insbesondere im Umweltbereich zur Verifikation von Ausbreitungsmodellen und zum Ausbreitungsverhalten von Luftströmungen verwendet.

Dieser Beitrag soll keine wissenschaftlichen Tracergasverfahren erläutern, sondern er zielt allein auf praktische Tracergasanwendungen in der Gebäudetechnik ab.

3 Die Wahl des Tracergases

Tracergase sollten folgende Eigenschaften weitgehenst erfüllen:

- ungiftig und im verwendeten Konzentrationsbereich keine Allergien hervorrufend
- nicht belastend für die Umwelt
- chemisch inert, geruchlos und geschmacklos
- nicht brennbar oder explosiv
- üblicherweise nicht in der Raumluft vorhanden
- möglichst kein Bestandteil der Außenluft
- leicht zu transportieren
- leicht und gut vermischbar mit Luft

- > leicht und möglichst preiswert mit großer Genauigkeit meßbar
- mit bewährter Meßtechnik erfaßbar, ohne daß Interferenzen mit anderen Gasen das Meßergebnis verfälschen
- > am Markt erhältlich
- preiswert.

In der Vergangenheit wurden Helium, Wasserstoff, Methan, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Lachgas und sogar radioaktive Gase verwendet. Wie leicht erkennbar, vereinen diese Gase nicht alle gewünschten Eigenschaften eines idealen Tracergases in sich. Meßverfahren und Eigenschaften von verwendeten Tracergasen enthält Tabelle 1.

Tracergase	chem. Formel	Meßmetho- de	Hintergrund- konzentration in Vol.anteilen	Detekti- ons- grenze in Vol.anteil en
Wasserstoff	H ₂	Thermischer		
Helium	Не	Leitfähikeits- detektor		800 ·10 ⁻⁶
Kohlendioxid	CO ₂			1· 10 ⁻⁶
Schwefelhexafluorid halogenierte Verbindungen: Freon 11 Freon 12 Perfluorocarbon Tracer, PFT: Perfluorodimethylcyclohexan (PDCH) Perfluoromethylcyclohexan	SF ₆ C ₈ F ₁₆ C ₇ F ₁₄	Gaschro- matograph mit Electron Capture Detector, (GC-ECD)	$0.85-1.5 \cdot 10^{-12}$ $305 \cdot 10^{-12}$ $22 \cdot 10^{-15}$ $4.5 \cdot 10^{-15}$	$ \begin{array}{c} 1 \cdot 10^{-12} \\ 5 \cdot 10^{-12} \\ 5 \cdot 10^{-12} \\ 1 \cdot 10^{-12} \\ 1 \cdot 10^{-12} \\ \end{array} \\ $
(PMCH) Perfluorodimethylcyclobutan (PDCB)	C ₆ F ₁₂		0.34 · 10 ⁻¹⁵	1·10 ⁻¹² *)
Kohlendioxid Schwefelhexafluorid Di-Stickstoffoxid, N ₂ O (Lachgas)	CO ₂ SF ₆ N ₂ O	Infrarotab- sorption	350 · 10 ⁻⁶ siehe oben 0.315 · 10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶ 1·10 ⁻⁷ 1·10 ⁻⁶

Tabelle 1: Tracergase, Meßmethoden und Detektionsgrenzen

Di-Stickstoffoxid, N₂0

Das in Deutschland noch vereinzelt verwendete Lachgas (Di-Stickstoffoxid, N_2O) darf in bewohnten Gebäuden nicht verwendet werden, da eine mögliche Gefährdung insbesondere bei schwangeren Frauen nicht auszuschließen ist. N_2O weist auf eine starke Adsorptionsneigung an Oberflächen bei Konzentrationen unter 1000 ppm und eine hohe Löslichkeit in Wasser auf. Tracergasmessungen in Schwimmbädern können falsche Ergebnisse liefern. Weiterhin kommt es bei der Konzentrationsmessung über IR-Spektroskopie zu einer nicht unbeträchtlichen Querempfindlichkeit zum in der Luft enthaltenen Wasserdampf.

Halogenierte Verbindungen

Halogenierte Verbindungen wurden auch häufig als Tracergas verwendet, sollten aber heute wegen ihres Ozonbildungspotentials nicht mehr verwendet werden.

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX -29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de

Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik

Schwefelhexafluorid

Schwefelhexafluorid, SF_6 ist ein äußerst stabiles Gas, welches erst oberhalb von 550° C zerfällt. Die Hintergrundkonzentration in der Atmosphäre liegt zwischen 0.85 - 1.5 ppt. Reines SF_6 ist ein in Druckgasflaschen erhältliches, verflüssigtes Gas, welches bei der Expansion verdampft und somit leicht in Luft zu injizieren ist. SF_6 im Versuch mit Ratten führte selbst bei 80 vol% SF_6 und 20 vol% O_2 zu keinerlei Reaktionen /1/. Der MAK-Wert für SF_6 /2/ wurde auf 1000 ppm festgelegt. Maximale Innenraumkonzentrationen in Wohngebäuden sollten max. 1/20 des MAK-Wertes betragen und es gehört zur eingeführten Praxis bei Tracergasmessungen, sogar 1/100 unter dem MAK-Wert zu bleiben. Bei automatischer Injektion sollte aus Sicherheitsgründen sogar max. 1/20 des MAK-Wertes erreicht werden, wenn im Falle einer Störung die gesamte Tracergasmenge aus der Gasflasche mit einem Male freigesetzt würde. SF_6 ist mit einem Gaschromatographen mit Electron Capture Detector (GC-ECD), wie z.B. dem Autotrac 101 von TracerTech, bis in den ppt-Bereich (10^{-12}) auf 3% Genauigkeit vom Anzeigewert meßbar und erfüllt als Tracergas in Gebäuden alle Eigenschaften eines idealen Tracergases.

 SF_6 ist gemäß VDI 4300, Blatt 7 /3/ das einzige Tracergas, welches in bewohnten Räumen eingesetzt werden darf, da die Konzentrationen unterhalb 100 ppb liegen, wenn mit einem GC-ECD gemessen wird kann.

Nichtsdestotrotz ist Schwefelhexafluorid ein Gas, welches aufgrund seiner Beständigkeit nur sehr langsam in der Atmosphäre abgebaut wird. Gerade aus diesem Grunde ist ein sorgsamer und sparsamer Umsatz mit geringen Emissionen wichtig. Auch das läßt sich nur wieder erreichen, wenn SF₆ bis in niedrigste Konzentrationen genau nachgewiesen werden kann.

Perfluorocarbon-Tracer

Die Perfluorocarbon-Tracer (PFT) wurden speziell als Spurengase für Messungen in der Atmosphäre hergestellt. Es gibt nur wenige Firmen weltweit, welche PFT herstellen. PFT sind in reinem Zustand bei Atmosphärendruck flüssig, d. h. vor der Injektion in Luft sind sie über geeignete Vorrichtungen zu verdampfen.

Wegen der sehr guten Detektierbarkeit genügt für den Einsatz in Gebäuden meist eine Mischung aus PFT und Luft, welche gasförmig in Druckflaschen bezogen werden kann.

PFT sind teurer als SF_6 , erfüllen aber ebenfalls alle sonstigen Eigenschaften eines idealen Tracers. Im Gegensatz zu SF_6 lassen sich PFT an Aktivkohle adsorbieren. Diese Eigenschaft wird bei der Luftwechselmessung nach der 'Konstant-Injektionsmethode' mit passiven Samplern ausgenutzt, mit der auch Luftströme von Raum zu Raum quantifizierbar sind. Da letztere Methode noch nicht zu den eingeführten Praxismessungen zählt, soll sie auch hier nur erwähnt bleiben (näheres in /4/5/). Weiterhin wird die Adsorptionseigenschaft der PFT zur Überprüfung des bypaßfreien Einbaus von Adsorptionsfiltern ausgenutzt, siehe Kap. 20. Der AUTOTRAC 101 Tracergasmonitor ist ebenfalls für die Konzentrationsmessung von Perfluorocarbontracern konfigurierbar, wobei max. 4 Gase parallel analysiert werden können.

Die Durchführung von Tracergasmessungen im ppb-Bereich und tiefer ist insbesondere bei großen Bürogebäuden und in industriellen Fertigungsstätten und Anlagen sehr bequem; hier werden nur geringste Tracergasmengen benötigt. SF $_6$ -Konzentrationen im ppb-Bereich liegen deutlich oberhalb der Hintergrundkonzentration von innen und außen. Eine besondere Sorgfalt im Umgang mit SF $_6$ ist nicht erforderlich, und die im Gebäude auftretenden Konzentrationen liegen um mehr als einen Faktor 10 000 unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte.

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



4 Die Tracergasmeßausrüstung

LUFTWECHSELMESSUNGEN

Zunächst sei ein Verfahren zur Messung des Luftwechsels erläutert, für welches der Anwender selbst gar keine Meßtechnik benötigt. TRACERTECH bietet für die Durchführung von Luftwechselmessungen nach der Konzentrationsabklingmethode ein Basis-Set und ein Kombi-Set an, siehe Abb. 1. Das Basis-Set besteht aus einer 50 ml Plastikspritze, welche mit reinem oder verdünntem SF₆, je nach Raumvolumen, gefüllt ist und 5 leeren Plastikspritzen zur Probenahme. Das Tracergas wird in den Raum injiziert, mit der Raumluft vermischt und in Abständen von 5-20 Minuten werden mit den leeren Spritzen Luftproben genommen. Diese werden anschließend zu TRACERTECH zur Analyse geschickt. Hier wird die SF6-Konzentration in den Spritzen analysiert und die Luftwechselzahl bestimmt.





Abb. 1: Basis-Set (links) zur Messung einer Luftwechselzahl und das Kombi-Set zur Messung von zwei Luftwechselzahlen bei unterschiedlichen Lüftungsverhältnissen mit nur einer Injektion

Als Erweiterung des Basis-Sets enthält das Kombi-Set 10 leere Probenahmespritzen. Nach der 5. Probenahme kann man die Lüftungsverhältnisse im Raum ändern, womit dann die Luftwechselzahlen eines Raumes bei zwei Randbedingungen gemessen werden können. Es ist nur eine Injektion am Anfang der Messung nötig. Der zur Verfügung stehende Konzentrationsbereich von ca. 50-100 ppb bis herunter zu ca. 300-500 ppt reicht hierzu in der Regel völlig aus. Praktische Anwendungen sind z.B.:

- Messung der Dichtigkeit/Infiltration des Raumes (Spritzen 1-5), alle Fenster und Türen geschlossen und danach Öffnen eines Kippflügels und erneute Messung der Luftwechselzahl (Spritzen 6-10)
- Messung der Dichtigkeit/Infiltration eines Gebäudes (Spritzen 1-5) bei abgeschalteter Lüftungsanlage und danach Einschalten der Lüftungsanlage und Messung der neuen Luftwechselzahl (Spritzen 6-10).

4.1 Anspruchsvollere Tracergasmessungen

Bei der Auswahl des jeweils geeignetesten Meßverfahrens ist unter Berücksichtigung der Anschaffungs- und Folgekosten insbesondere die Art der durchzuführenden Messungen entscheidend. Zunächst soll auf die verschiedenen versuchstechnischen Möglichkeiten eingegangen werden. Hierbei sind folgende Aufgaben durchzuführen



- 1. die Tracergasinjektion
- die Probenahme und
- die Tracergasanalyse.

Die Art der Meßaufgabe selbst legt fest, ob eine automatische oder ein manuelle Meßdurchführung notwendig bzw. geeignet ist.

4.2 Möglichkeiten der Tracerinjektion

4.2.1 Plastikspritzen

Eine einfache und gleichzeitig wirkungsvolle Art der Tracerinjektion erfolgt manuell über eine Plastikspritze, wie sie in Abb. 2 dargestellt ist. Die Spritze wird direkt von der Gasflasche mit Druckminderer über einen ¼" Schlauch gefüllt. Die injizierte Menge kann genau an der Skala abgelesen werden. Weiterhin ist die Konzentration in der Spritze über teilweises Entleeren und wieder Aufziehen im Freien verdünnbar, was sehr bequem zur richtigen Dosierung bei Luftwechselmessungen ist. Von immensem Vorteil aber ist, daß bei der manuellen Injektion der Injizierende z.B. mit großen Armkreisen durch den Raum/die Räume gehen kann, um das Tracergas gut mit der Raumluft zu vermischen.

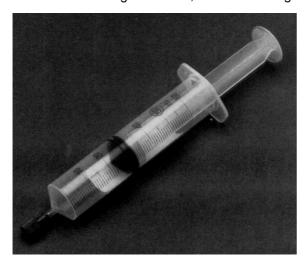


Abb. 2: 50 ml Plastikspritze zur Injektion und zur Probenahme mit Verschlußstopfen und Aufkleber

Eine übliche 50 ml Plastikspritze ist mit max. 60 ml reinen Tracergases befüllbar, wobei 60 ml SF_6 für Luftwechselmessungen bis zu Raumvolumina von 3000 m³ ausreichen. Bei größeren Räumen nimmt man einfach mehrere SF_6 -Spritzen. Luftwechselmessungen in großen Räumen von bis zu 100.000 m³ wurden so schon präzise durchgeführt.

4.2.2 Durchflußmesser

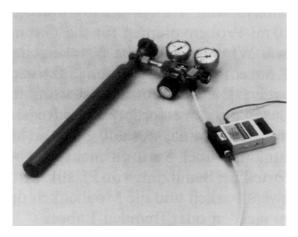
Die Tracergasinjektion kann auch direkt aus der Gasflasche mit Druckminderer über einen Durchflußmesser mit Feinregulierventil erfolgen. Hierbei kann der Durchflußmesser ein elektronischer Massendurchflußmesser (Abb. 3a), ein Schwebekörperdurchflußmesser (Abb. 3b,) oder ein kritisches Drosselelement sein. Dieses manuelle Injektionsverfahren hat den Vorteil, daß die Gasflasche leicht an den Injektionsort gebracht werden kann, welcher insbesondere bei großen Gebäuden weit von den Probennahmestellen entfernt sein kann, z.B. bei Volumenstrommessungen in Lüftungskanälen. Hierdurch

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX –29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



erübrigt sich das zeitaufwendige Verlegen von Schläuchen. Um das Tracergas gut mit der Raumluft zu verteilen, wie z.B. bei Luftwechselmessungen erforderlich, eignen sich besonders kleine, leicht transportierbare Gasflaschen, mit denen man unter dem Arm solange in der großen Halle herumläuft, bis die notwendige Tracergasmenge injiziert ist.



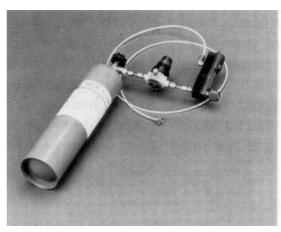


Abb. 3: links: Leicht transportierbare Injektionseinheit bestehend aus Hochdruck-Tracergasflasche mit Druckminderer und elektronischem Massendurchflußmesser rechts: Leicht transportierbare Niederdruckgasflasche mit Druckregulierventil und Schwebekörperdurchflußmesser

4.2.3 Automatisches Dosieren mit Drosseln und Ventilen

Über den AUTOTRAC 101 läßt sich ein AUF/ZU Magnetventil kontrolliert steuern. AUTOTRAC öffnet z.B. bei einer Luftwechselmessung nach der Konzentrationsabklingmethode solange das Ventil, bis die Anfangskonzentration im Raum erreicht ist. Danach schließt AUTOTRAC das Ventil und führt die anschließende Luftwechselmessung mit den Probenahmen durch. Beliebig viele Luftwechselmessungen können damit automatisch und unbeaufsichtigt nacheinander durchgeführt werden. Gleiches gilt für Volumenstrommessungen und andere Meßverfahren.

Aufwendiger ist eine automatische Injektion mit einer Dosiereinheit, wie z.B. dem 5-Kanal-Injektor von Tracertech. Zunächst einmal liegt der finanzielle Aufwand in der Größenordnung des Autotrac 101 Tracergasmonitors selbst. Außerdem müssen Schläuche für die Injektion an die verschiedenen Stellen im Gebäude verlegt werden. Dafür aber ist es auch möglich, anspruchsvolle und wissenschaftliche Tracergasmessungen automatisch und ohne Beaufsichtigung über längere Zeiten durchzuführen, wie z.B. die Messung des Außenluftwechsels nach der Konstant-Konzentrationsmethode. Diese Meßmethode ermöglicht die kontinuierliche Messung des Außenluftwechsel über der Zeit in mehreren Räumen. Da diese Meßmethode bislang nur in Forschungsprojekten angewendet wird und sie nicht zu den Praxismessungen zu zählen ist, sei sie hier auch nicht weiter erläutert. Näheres siehe in /5/.

4.3 Möglichkeiten der Probennahme

4.3.1 Plastikspritzen

Plastikspritzen eignen sich ideal zur manuellen Probennahme. Jeder, der schon mal Schläuche durch Gebäude verlegen mußte, wird dieses zu schätzen wissen. Plastikspritzen sind preiswert, einfach und unkompliziert zu benutzen und dicht. Bei Aufbewahrungsdauern von 1-2 Monaten ist eine Abnahme der Konzentration nicht nachweisbar. Nach 3 Monaten wird man bei einigen Spritzen evtl. Änderungen

bis zu 5% feststellen. Über einen Aufkleber auf der Spritze lassen sich alle wichtigen Informationen wie Meßort und Probenahmezeit festhalten. Mit einem Verschlußstopfen wird die Spritze dicht verschlossen. Eine praktische Anwendung von Plastikspritzen ist nur bei der Tracergasanalyse mit Gaschromatograph gegeben, da hier nur 10 ml Probenvolumen für die Gasanalyse notwendig sind. Wird eine übliche 60 ml Spritze benutzt, kann die Konzentrationsbestimmung praktisch 6 mal wiederholt werden. Die Konzentrationsbestimmung mittels Infrarot-Gasanalysator erfordert wesentlich größere Probenvolumina, weshalb dort die Möglichkeit der Probennahme über Spritzen nicht gegeben ist.

Die Nutzung von Plastikspritzen ermöglicht ebenfalls eine spätere Analyse im Labor. Für die Praxis heißt das, daß die gesamte Gasanalyseapparatur im Bedarfsfall nicht ins Meßgebäude gebracht und dort installiert werden muß, sondern in einem (eigenen oder externen) Labor stationär verbleiben kann. Das Meßpersonal bringt oder schickt per Post die Gasproben ins Labor, wo diese ausgewertet werden. D.h. selbst aufwendige Tracergasmessungen lassen sich ohne große Investitionen in Geräte durchführen, wenn die Probenahmespritzen zur Analyse zu TRACERTECH geschickt werden. Der Nachteil ist allerdings, daß man die Konzentrationsverläufe nicht während der Messung verfolgen kann und das Ergebnis erst später erhält.

Ein weiterer großer Vorteil im Vergleich zur Konzentrationsmessung über Schläuche ist es, daß man nicht punktuell an einem Ort die Probe zieht, sondern beim Aufziehen der Spritze auch durch das Gebäude oder den Raum gehen kann (wichtig bei Luftwechselmessungen!) und damit eine mittlere Raumkonzentration erhält.

Möchte man bei hohen Hallen auch in größeren Höhen manuell Spritzen aufziehen, so kann man vor der Messung einen dünnen PE-Schlauch von der Decke zum Boden verlegen und unten eine Spritze anschließen und Proben nehmen. Der 1/8"-Schlauch von TRACERTECH ist hierzu ideal geeignet. Um eine frische Probe zu erhalten, ist einmal der Schlauch mit der Spritze zu spülen.

Hat man z.B. bei der Abnahme eines Quelllüftungssystems an vielen Stellen im Raum mehrere Proben zu nehmen, so ist es wesentlich wirtschaftlicher, für die kurze Meßdauer Hilfskräfte an den jeweiligen Orten zu plazieren und Spritzen aufziehen zu lassen als Schläuche zu verlegen. Außerdem arbeiten die meisten Gasanalysatoren nicht so schnell, um alle Meßkanäle schnell zu scannen.

Allein aus diesen Ausführungen wird klar, daß Tracergasmessungen wirtschaftlich vertretbar und gleichzeitig exakt nur mit dem Tracergas SF₆ und der Analyse mit dem Tracergasmonitor AUTOTRAC 101 machbar sind.

4.3.2 Probenahmebeutel

Als Probenahmebeutel dienen meist alukaschierte Beutel, wie sie in Abb. 4 dargestellt und im Handel erhältlich sind. Zur Probenahme wird eine elektrische Pumpe oder ein Handgerät benötigt. Insbesondere im Umweltbereich werden über Zeitschaltuhren gesteuerte Pumpen mit Multiplexer zur automatischen Probennahme mit mehreren Beuteln verwendet. Probenahmebeutel ermöglichen ein größeres Probenvolumen, wie es für IR-Analyse notwendig ist. Ein Versand per Post im gefüllten Zustand wie bei den Plastikspritzen ist wesentlich voluminöser.



Abb. 4: Alukaschierte Probenahmebeutel (Photo Linde AG)

Bei Tracergasmessungen, wo die Konzentrationen stark schwanken, wie z.B. bei Ausbreitungsmessungen in der Atmosphäre oder der Volumenstrommessung in Doppelfassaden, bietet sich eine kontinuierliche Probenahme mit Beuteln an. Nach dem Versuch wird dann eine Gasprobe mittels Spritze dem Beutel entnommen und wegen des einfacheren Transports verschickt.

4.3.3 Probenahme über Schläuche

Eine Probenahme kann auch über Schläuche vom Meßort bis zum Analysegerät erfolgen, wozu eine Pumpe und ggf. ein Multiplexer zur Bedienung mehrerer Meßstellen erforderlich ist. Der AUTOTRAC 101 hat optional bis zu 9 Probenahmekanäle und die Pumpe direkt im Gerät integriert. Über die Software kann jeder Kanal individuell angesteuert werden. Einer der 9 Kanäle ist ein Frontport an der Vorderseite des Gerätes, über welchen außerdem auch manuell Spritzen analysiert werden können, siehe Abb. 5.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 11 von 36



Abb. 5: Die Analyse einer Luftprobe in einer Plastikspritze mit dem AUTOTRAC 101 Tracergasmonitor

4.4 Tracergasanalyse mit dem Autotrac 101

Der Autotrac 101 analysiert ausschließlich die Tracergase SF₆ oder Perfluorocarbontracer. Er unterscheidet sich von anderen Gasanalysegeräten dadurch, daß er speziell für die Durchführung von Tracergasmessungen entwickelt wurde und auch für Feldversuche sicher einsetzbar ist. Er wird auch mobil in Meßfahrzeugen zur Online-Messung benutzt. Neben den schon erwähnten Einrichtungen zur Probenahme, der Steuerung der Injektion, der Genauigkeit und der Stabilität ist wichtig, daß der Autotrac 101 im Gehäuse eine Kalibriergasflasche enthält, mit wecher er sich automatisch vor jeder Messung selbst kalibriert. Das dauert etwa 5 Minuten. Bei üblicher Nutzung hält eine Kalibriergasflasche ca. 1 Jahr. Über die eingebaute Elektronik sind ohne einen externen PC Funktionen wie Luftwechsel, Volumenstrommessung, Abzugshaubenvermessung und Lüftungsanlagentest abrufbar.

Der AUTOTRAC 101 ist ein Gaschromatograph, welcher ohne Detailkenntnisse der Gaschromatographie von jedem Techniker und Ingenieur problemlos benutzt werden kann.

5 Adsorptionsproblematik

Ein häufig zu hörendes Argument gegen die Verwendung von Tracergasen im ppb- bis ppt-Bereich ist, daß einige Moleküle an Oberflächen adsorbiert werden und bei den sehr geringen Konzentrationen zu Fehlmessungen führen. Dieses Argument ist sicherlich bei einigen Tracergasen berechtigt. Schwefelhexafluorid aber ist ein sehr stabiles Molekül. Bisher bekannte Adsorptionseffekte liegen meist jenseits der Nachweisbarkeit.



6 Volumenstrommessung mit Tracergasen

In Abb. 6 ist die Vorgehensweise bei der Volumenstrommessung grafisch dargestellt. Stromaufwärts vom Luftstrom wird über eine Injektionslanze das Tracergas mit konstantem Volumenstrom injiziert. Stromabwärts wird die Konzentration C_2 gemessen. Sicherheitshalber kann die Konzentration C_1 vor der Injektionsstelle mit gemessen werden.

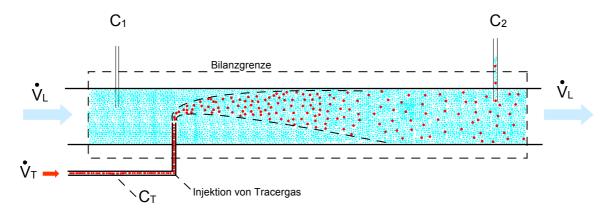


Abb. 6: Volumenstrommessung bei Verwendung von Tracergas

Der Luftvolumenstrom ergibt sich zu

$$\dot{V_L} = \frac{\dot{V_T} \cdot c_T}{c_2 - c_1}$$
 Glg. 1

V. = zu messender Luftvolumenstrom

 V_{τ} = Volumenstrom des reinen oder verdünnten Tracers

 c_T = Konzentration des injizierten Tracergases; bei Verwendung von reinem Tracergas ist c_T = 1

 c_1 = Tracergaskonzentration stromaufwärts vor der Injektionsstelle

 c_2 = Tracergaskonzentration stromabwärts hinter der Injektionsstelle

Diese Art der Volumenstrommessung bietet sich insbesondere dort an, wo herkömmliche Verfahren mittels Pitot-Traverse, Anemometer oder Meßblende aufgrund von nur unvollständig ausgebildeter Rohrströmung nach Krümmern, Verzweigungen oder Ventilatoren versagen und wo hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Volumenstrommessung gestellt werden. Meßungenauigkeiten durch Fehlbedienungen wie z. B. das Verkanten des Pitotrohres oder unsauberes Abfahren des Rohrquerschnitts sind bei der Volumenstrommessung mit Tracergasen nicht gegeben. Es muß allerdings sichergestellt sein, daß das Tracergas gleichmäßig mit der Luft im Kanal vermischt ist. Das läßt sich aber wiederum kontrollieren, indem an verschiedenen Stellen im Meßquerschnitt die Konzentration bestimmt wird. Die Genauigkeit der Volumenstrommessung hängt von der Güte der Tracerinjektionskonzentration, der Präzision der Durchflußmessung des Injektionsgases und der Konzentrationsanalyse selbst ab. Mit AUTOTRAC 101 und elektronischem Massendurchflußmesser liegt die Meßgenauigkeit unter 2 %.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 13 von 36



Selbst bei großen Volumenströmen in der Gebäudetechnik reicht zur Injektion meist ein verdünntes Tracergas-Luftgemisch aus. Der Vorteil besteht zum einen darin, daß das verdünnte Gasgemisch aus SF₆ und Luft unterhalb 1% nahezu ein spez. Gewicht von Luft hat und sich somit leichter vermischt als reines SF₆. Zum anderen können Durchflußmesser benutzt werden, welche für Luftdurchsatz geeicht sind. Sie müssen somit nicht mehr zusätzlich für die speziell verwendete Tracergaskonzentration kalibriert bzw. umgerechnet werden.

Wo sind nun die besonderen Anwendungen für eine Tracergasvolumenstrommessung? Neben der Gebäudetechnik eignet sie sich sehr gut für die Vermessung von Klimaanlagen in Fahrzeugen wie PKW, LKW, Bus, Bahn und auch in Flugzeugen, wo bei engstem Einbau extrem viele Krümmer untergebracht sind. Ohne großen apparativen Aufwand ist eine Volumenstrommessung mit der in Kap. 4.2.2 erläuterten manuellen Injektion, der Probenahme mit Spritzen und einer späteren Analyse der Spritzen im Labor machbar.

Der Abgasvolumenstrom von Schornsteinen ist exakt meßbar. Hier ist die Messung mit Pitot-Traverse teilweise mit Gefährdung des Meßpersonals durch hohe Abgaskonzentrationen oder bei Kernkraftanlagen mit hoher Strahlenbelastung verbunden. Die einmalige Anbringung einer Probenahmestelle im oberen Bereich des Schornsteins und eine Probenahmeschlauchverlegung nach unten machen hier sogar eine Besteigung des Schornsteins gänzlich überflüssig. Der Aufwand für eine Messung wird damit minimal, womit die Kosten unterhalb der traditionellen Meßverfahren liegt.

Erfolgreich wurde die Volumenstrommessung über Tracergase in den USA bei der Messung des Gasdurchsatzes in Erdgaspipelines eingesetzt /7/. Hier konnte die Meßabweichung auf unter 1,5% gesenkt werden. Ebenso ist das Meßverfahren zur Bestimmung der sehr großen Volumenströme in Bergwerken und Straßentunnels geeignet..

Abb. 7 zeigt die Belüftung eines Dieselgeneratorraums. Hier ist eine Volumenstrommessung über einen Lüftungskanal nicht möglich. Die konventionellen Methoden sind nur unter Inkaufnahme großer Meßunsicherheiten anwendbar. Bei Injektion eines konstanten Tracergasvolumenstroms hinter dem Axiallüfter und Probenahme am Abluftgitter ist die Förderleistung des Ventilators unter Einbauverhältnissen (einschl. Windanfall) gemäß Glg. 1 mit $c_1 = 0$ quantifizierbar.

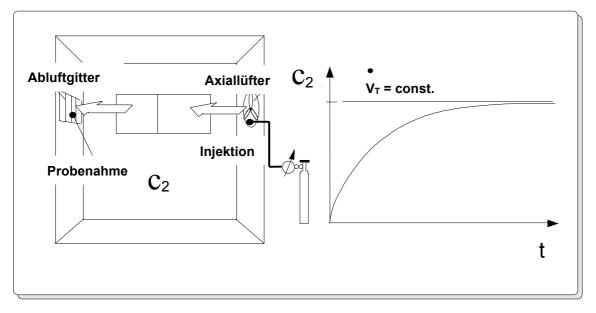


Abb. 7: Bestimmung der Lüfterleistung in einem Dieselgeneratorraum mittels Tracergas

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 14 von 36



Im Wohnungsbau wie auch in Ställen zur Nutztierhaltung sind dezentrale Raumabluftventilatoren üblich. Die Luftleistung in eingebautem Zustand kann wegen zu geringer Nachströmöffnungen oder Winddruck auf die Lüfterwand beträchtlich von der Nennleistung abweichen. Die Vorgehensweise mit einem Tracergas wäre, wie in Abb. 8 gezeigt, die konstante Injektion eines Tracergases in den Raum bei intensiver Vermischung mit einem Raumlüfter. Die Lüfterleistung bestimmt sich wie im vorigen Beispiel. Eine noch einfachere Bestimmung der Lüfterleistung ist in Kap. 7 beschrieben.

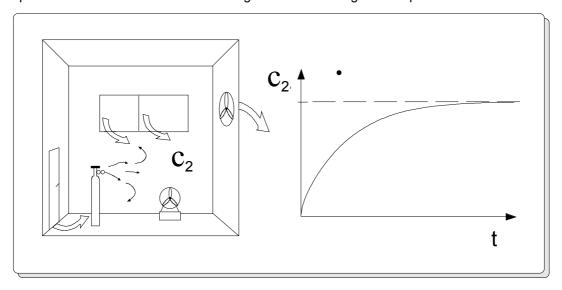


Abb. 8: Bestimmung der Lüfterleistung eines Abluftventilators nach der Konstant-Injektionsmethode

7 Bestimmung der Lüfterleistung eines Raumabluftgerätes im eingebauten Zustand

Obwohl es sich bei der nachfolgenden Messung eigentlich um eine Luftwechselmessung handelt, soll sie der Vollständigkeit halber hier nicht unerwähnt bleiben. Nachteilig bei den zuvor beschriebenen Verfahren ist insbesondere bei größeren Raumvolumina und geringen Luftwechseln, daß relativ lange nach Beginn der kontinuierlichen Injektion gewartet werden muß, bis die Konzentration des Tracers im Raum konstant ist. Weiterhin wird eine Injektionseinheit mit Durchflußmessung benötigt, was den apparativen Aufwand etwas erhöht. Das nachfolgend beschriebene Verfahren ist wesentlich einfacher.

Benötigt wird hierzu wiederum nur das Basis-Spritzenset aus Abb. 1. Das Tracergas wird mit der Injektionsspritze nach Einstellung der richtigen Tracermenge wieder gut im Raum verteilt. Ein Lüfter im Raum oder das ständige manuelle Vermischen der Raumluft mit einer Zeitung in der Hand kann hier vorteilhaft sein, da sich über die punktuelle Absaugung leicht Strömungspfade im Raum einstellen, so daß die Voraussetzung einer vollständigen Durchmischung nicht mehr gegeben sein kann. Nach der einmaligen Injektion wird jetzt zur Probennahme wie bei einer Luftwechselmessung vorgegangen. Zusätzlich werden jetzt noch die Raummaße abgemessen und das Raumvolumen V_R möglichst genau bestimmt. Die Analyse der Luftproben ergibt wieder den Luftwechsel n. Die Lüfterleistung \dot{V}_L berechnet sich dann über

$$\dot{V}_{I} = n \cdot V_{R}$$
 Glg. 2

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX –29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de

TGmess gesamt9.doc; 17.09.2002 Seite **15** von 36



Die Genauigkeit der Volumenstrommessung hängt jetzt direkt von der Genauigkeit der Raumvolumenbestimmung und der Luftwechselzahl ab. Schränke, Sessel, Sofa und sonstige Einbauten vermindern das Bruttoraumvolumen und sind häufig nur mit größerem Aufwand genau auszumessen. Eine Überprüfung der Stimmigkeit der Messung kann deshalb folgendermaßen erfolgen:

Nach der Injektion des Tracergases wird zusätzlich zur Injektionszeit die injizierte Spurengasmenge V_{τ} festgehalten. Eine Extrapolation der Regressionsgeraden bis zurück zum Zeitpunkt der Injektion, siehe Abb. 9 ergibt eine theoretische Anfangskonzentration c_0 .

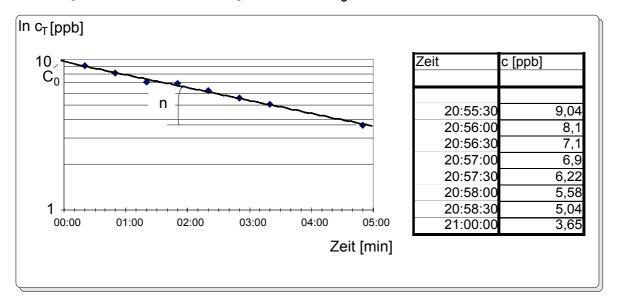


Abb. 9: Luftwechselmessung zur Bestimmung der Förderleistung eines Abluftgerätes im eingebauten Zustand, Zeitpunkt der Injektion war bei 00:00 min

Über die bekannte Menge des injizierten Tracergasvolumens V_T berechnet sich das effektiv am Luftwechsel teilhabende Raumvolumen dann zu

$$V_{R,eff} = \frac{V_{T}}{C_{o}}$$
 Glg. 3

Ein Vergleich zwischen V_R und $V_{R,eff}$ ermöglicht eine Plausibilitätskontrolle und zeigt die Qualität der Messung. Abb. 9 zeigt Meßwerte eines Tracergastests in einem Bad mit einem Abluftgerät, Nenndurchsatz $90~m^3/h$. Der Versuch wurde bei geschlossener Badezimmertüre mit Bodenfuge durchgeführt. Das Netto-Raumvolumen konnte wegen der einfachen Geometrie recht genau zu $V_{R,brutto} = 5,20~m^3$ ermittelt werden. Die Ermittlung des Waschtischvolumens wurde überschlagen mit $V_{Waschtisch} = 0,02m^3$. Abzüglich des Körpervolumens der die Messung durchführenden Person von $V_{Mensch} = 0,07~m^3$ ergibt sich das Netto-Raumvolumen zu $V_{R,netto} = 5,11~m^3$. Mit dem gemessenen Luftwechsel von $n = 11,79~h^{-1}~\pm 0,02$ ergibt sich ein Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_L = 63~m^3/h~\pm 1,7$. Mit der Anfangskonzentration von $c_0 = 9,03~ppb$ berechnet sich das effektive Raumvolumen (also jenes, welches von Spurengasmolekülen eingenommen wird) zu $V_{R,eff} = 5,25~m^3$.

Das geometrisch bestimmte und das effektive Volumen stimmen hier bis auf $\pm 2,8\%$ überein. Die Messung stellt sowohl vom technischen Aufwand (ein Basis-Set entspr. Abb. 1), der Einfachheit als auch von der Genauigkeit her eine interessante Perspektive zu herkömmlichen Meßverfahren dar.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 16 von 36



8 Effizienz einer Lüftungsanlage im Gebäude

8.1 Bestimmung des Frischluftanteils bei Umluftbetrieb

Über Messungen von Volumenströmen und Luftwechselzahlen hinaus lassen sich Tracergase zum Funktionsnachweis von Lüftungsanlagenaggregaten, zur Messung von Umluftanteilen, Frischluftanteilen, Leckagen oder zur Auffindung ungewollter Strömungspfade einsetzen. Die anzuwendende Meßmethode hängt von dem Gebäude und von der Art des Lüftungssystems ab. Ein häufig zu findendes Auslegungsschema einer zentralen Lüftungsanlage ist in Abb. 10 dargestellt. Durch Injektion eines

konstanten Tracergasvolumenstromes V_T in den Zuluftkanal und Meßstellen im Zuluftstrom vor (C_3) und hinter (C_1) der Injektionsstelle, sowie in der Abluft (C_2) und im Raum ($C_r = C_2$) läßt sich über ein-

fache Massenbilanzen für den stationären Zustand die Zuluftmenge, V_1 , der prozentuale Außen-

luftanteil P_{AL} und die Größe der Gebäudeinfiltration $V\mathit{Inf}$ bestimmen.

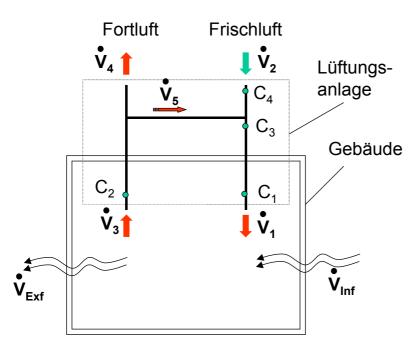


Abb. 10: Schematisierte Darstellung einer Lüftungsanlage mit Wärmetauscher

$$\dot{V}_{_{1}} = \frac{\dot{V}_{_{T}}}{C_{_{1}} - C_{_{3}}}$$
 Glg. 4

$$\dot{V}_{lnf} = \dot{V}_{1} \left(\frac{C_{1}}{C_{2}} - 1 \right)$$
 Glg. 5

TGmess gesamt9.doc; 17.09.2002 Seite 17 von 36



$$P_{AL} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = 1 - \frac{C_3}{C_2}$$
 Glg. 6

8.2 Bestimmung des Leckageanteils bei (rekuperativen) Wärmeaustauschern

Das gleiche Verfahren ist anwendbar, wenn Undichtigkeiten in Wärmeaustauschern quantifiziert werden sollen. Anstelle der Lüftungsanlage denke man sich einen Wärmeaustauscher, wobei der Volu-

menstrom V_{5} dem Leckagestrom entsprechen würde. Dieser bestimmt sich dann zu

$$\dot{V}_{5} = \dot{V}_{T} \cdot \frac{C_{3}}{C_{2}(C_{1} - C_{3})}$$
 Glg. 7

und der prozentuale Leckageanteil PLeck zu

$$\mathsf{P}_{\mathsf{Leck}} = \frac{\dot{\mathsf{V}}_{\mathsf{5}}}{\dot{\mathsf{V}}_{\mathsf{c}}} = \frac{\mathsf{C}_{\mathsf{3}}}{\mathsf{C}_{\mathsf{2}}}$$
 Glg. 8

Sowohl in Abschnitt 2 als auch hier ist vorausgesetzt, daß über die Außenatmosphäre, also zwischen Fortluftauslaß und Frischlufteinlaß keine lufttechnische Verbindung bzw. Übertragung von Tracergas stattfindet.

Das Zutreffen dieser Voraussetzung läßt sich überprüfen, indem zusätzlich die Tracergaskonzentration C_4 mitgemessen wird. Liegt hier eine nennenswerte Konzentration vor, sollte der Strömungspfad über die Außenluft genauer quantifiziert werden, siehe Kap. 8.3.

8.3 Wiedereintritt von Fortluft ins Gebäude

Abb. 11 zeigt zwei mögliche Strömungspfade, über welche Fortluft wieder ins Gebäude gelangen kann.

- einmal durch Ansaugung über eine ungünstig angeordnete Frischluftöffnung
- oder durch Infiltration an der Gebäudeaußenhaut.

Zur Messung injiziert man einen konstanten Tracergasvolumenstrom in den Fortluftkanal und mißt an einer oder mehreren Frischluftöffnungen. Der prozentuale Anteil der wiedereintretenden Fortluft P_w bestimmt sich zu

$$P_{w} = \frac{\dot{V}_{F} \cdot C_{F}}{\dot{V}_{T}}$$
 Glg. 9

 V_F = Frischluftvolumenstrom

 C_F = Tracergaskonzentration in der Frischluft

 V_T = Volumenstrom des injizierten Tracergases

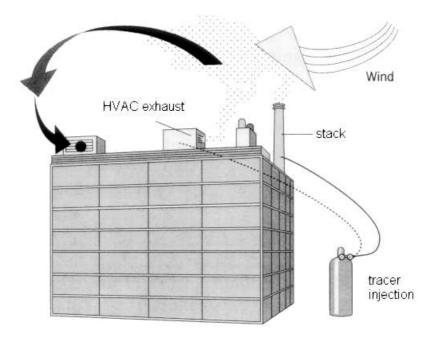
Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



In vielen Gebäuden ist der Wiedereintritt von Fortluft außer über die Frischluftansaugung auch über weitere Stellen möglich, wie z. B. an den unter Unterdruck stehenden Gebäudeseiten, an Fahrstuhlund Treppenhausschächten und an Eingangsbereichen.

9 Eintritt von Abgasen ins Gebäude

In der Abb. 11 ist ein recht häufig vorkommender Fall skizziert, in welchem Abgase oder Rauchgase über die gleichen Eintrittspfade, wie in Kap. 8.3 erwähnt, ins Gebäude strömen. Hierbei kann es sich um den gebäudeeigenen Schornstein oder um Schornsteine von benachbarten Gebäuden handeln. Zur Meßdurchführung wird in diesem Fall in den Schornstein ein zeitlich konstanter Tracergasstrom injiziert. Die Berechnung erfolgt analog entsprechend Glg. 6. Bei Kenntnis der Konzentrationen einzelner Abgasbestandteile im Schornstein kann über das Verhältnis P_W die mögliche Gebäudekonzentration der Abgase bestimmt und die Gefährdung der Bewohner abgeschätzt werden.



fresh air intake

Abb. 11: Wiedereintritt von Fortluft bzw. Abgasen eines Schornsteins ins Gebäude

$$c_{i.Geb\"{a}ude} = P_W \cdot c_{i.Schornstein}$$
 Glg. 10

C_{i,Gebäude} = Konzentration der Schadgaskomponente 'i' im Gebäude

C_{i,Schornstein} = Konzentration der Schadgaskomponente *'i'* im Schornstein

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 19 von 36



10 Risikoabschätzung eines Schadgasaustritts

Abb. 12 zeigt eine Lagerstätte von gefährlichen Stoffen. Hier könnte es sich aber genauso um eine naheliegende Chemieanlage handeln, eine Erdgasdruckstation oder irgendein Gebilde, bei welchem durch einen Unfall die Möglichkeit eines Schadgasaustrittes besteht.

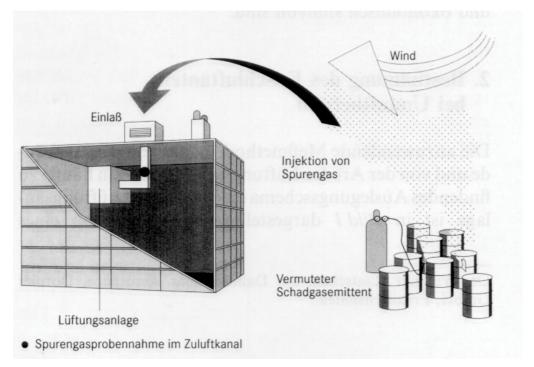


Abb. 12: Schadgaseintritt von äüßerer Quelle ins Gebäude

Ähnlich wie in Kap. 8.3 und 9 beschrieben, läßt sich für eine gegebene meteorologische Situation über eine konstante Injektion am vermuteten Gasaustrittsort der Einfluß auf benachbarte Gebäude quantitativ bestimmen. Mit der über einen längeren Zeitraum gemessenen mittleren Tracergaskonzentration an diversen Stellen im Gebäude erhält man mit Glg. 11 eine 'worst case'-Analyse.

$$P_{w} = \frac{\dot{V}_{z} \cdot C_{z}}{\dot{V}_{r}}$$
 Glg. 11

 \dot{V}_z = Zuluftvolumenstrom in den Raum, wo die Tracergaskonzentration C_z gemessen wird

 V_T = Volumenstrom des injizierten Tracergases

Eine 2. Möglichkeit der Risikobewertung wird versuchstechnisch so durchgeführt, daß eine Pulsinjektion - stellvertretend für eine Freisetzung während eines bestimmten Schadgasstörfalls - mit einem Tracergas am potentiellen Schadensort stattfindet und die mögliche Exposition der Bewohner in den Nachbargebäuden für dieses definierte Schadensereignis bestimmt wird. Dieses kann einmal in der Art geschehen, daß die Tracergaskonzentrationen kontinuierlich aufgezeichnet werden oder indem eine inte-grierende Tracergasmessung über Probenahmebeutel mit kontinuierlich arbeitender Probenahmepumpe gemacht wird.

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX –29 Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de

TGmess_gesamt9.doc; 17.09.2002 Seite **20** von 36



Die spezifische Tracergasdosis 'd' an einer Meßstelle wird über Glg. 12 bestimmt

$$d = \frac{C_{\text{Beutel}} \cdot \Delta t}{V_{\text{T}}}$$
 Glg. 12

C_{Beutel} = Tracergaskonzentration im Probenahmebeutel

*t = Dauer der Probenahme

VT = Emittiertes Tracergasvolumen

Die tatsächliche Dosis im Schadgasaustrittsfall berechnet sich bei einer Freisetzungsmenge V_s eines bestimmten Schadgases (Index s) zu

$$D = d \cdot V_s$$
 Glg. 13

Im Vergleich zur kontinuierlichen Tracergasfreisetzung hat die Pulstechnik den Nachteil, daß sie in wesentlich stärkerem Umfang von den lokalen temporären Windverhältnissen abhängt.

11 Wirksamkeit von Abzugshauben

Die Typprüfung von Abzügen ist in Deutschland in DIN 12924, Teil 1 sowie in USA in ANSI/ASHRAE 110 geregelt. Die Testmethoden erfordern den Einsatz eines Tracergases und ähneln sich in vielen Punkten.

Zum Funktionstest wird ein Mannekin vor die Abzugshaube gestellt, ein verdünnter Tracergasstrom im Abzug freigesetzt und bei unterschiedlicher Betriebsweise der Abzugseinheit (Öffnungsweite des Frontschiebers, Veränderung des Absaugvolumenstroms) die Tracergaskonzentration im Nahbereich des Frontschiebers sowie an diversen Stellen im Abzugsinneren gemessen, Abb. 13.

Üblicherweise strömt der Tracergasstrom kontinuierlich und diffus aus. Die Durchflußmessung des Tracergases aus der Gasflasche kann über eine Blende oder einen elektronischen Massendurchflußmesser erfolgen.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 21 von 36

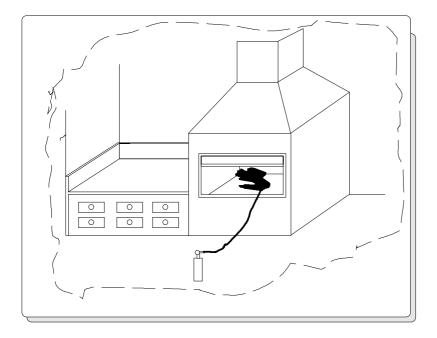


Abb. 13: Schematische Darstellung einer Meßanordnung zum Test von Abzugshauben

Risikoabschätzung und Optimierung der Abzugsleistung

Die Ergebnisse eines solchen Tests eignen sich zur Anpassung der Lüfterleistung des Abzugs in bezug auf eine Optimierung der Konzentrationslevel bei gleichzeitiger Minimierung der Energiekosten zum Betreiben des Lüfters. Hierzu empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

das Tracergas wird im Abzug freigesetzt, wobei die Raumluft auf Vorhandensein von Tracergasmolekülen analysiert wird. Ebenso wird die Tracergaskonzentration im Ablufkanal C_{ALK} gemessen, woraus sich der Abluftvolumenstrom \dot{V}_{ALK} ergibt zu

$$\dot{V}_{ALK} = \frac{C_{T} \cdot \dot{V}_{T}}{C_{ALK}}$$
 Glg. 14

mit

 C_T = Tracergaskonzentration der Injektionsflasche (C_T = 1, wenn reines Tracergas injiziert wird)

 \dot{V}_{T} = Volumenstrom des Tracergasinjektionsgemisches

Wird nun an einer der Meßstellen (Atmungsbereich des Mannekins, oder im Raum) eine Tracergaskonzentration festgestellt, so gibt das Verhältnis von Raumkonzentration C_R zu Abluftkanalkonzentration C_{ALK} ein Maß für die Wirksamkeit der Abzugshaube an; dieses wird auch als Verdünnungsverhältnis R_{Abzug} interpretiert.

$$R_{Abzug} = \frac{C_R}{C_{ALK}}$$
 Glg. 15

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 22 von 36



Die Kenntnis des Verdünnungsverhältnis R_{Abzug} ermöglicht die Abschätzung von Gesundheitsgefahren für das Laborpersonal durch die verwendeten und im Abzug freigesetzten Gase. Das nach Glg. 12 bestimmte Verdünnungsverhältnis hat für alle Gase und Dämpfe Gültigkeit, solange sie nicht weiter chemisch reagieren oder kondensieren.

Dieser Messung läßt sich nun nicht entnehmen, ob das Tracergas, welches möglicherweise an einer Stelle im Raum detektiert wird, direkt über den Frontschieber des Abzugs in den Raum strömt oder zunächst abgesaugt wird und dann über undichte Kanäle oder Nebenräume zurückströmt. Insbesondere bei solchen Abzügen, welche den Abzügsventilator direkt hinter der Abzügshaube eingebaut haben, steht die Abluftleitung unter Überdruck. Kanalleckagen ermöglichen damit auch ein Austreten von Schadgasen in nebenliegende Räume und sogar andere Etagen. Aus diesem Grunde bietet sich hier auch immer eine gleichzeitige Probenahme in benachbarten Räumen an. In der Praxis ist das bei kontinuierlicher Probenahme mit großem Aufwand für die Schlauchverlegung verbunden. In Laborgebäuden ist eine einfache Schlauchverlegung wegen der geforderten Unterdruckhaltung und der damit einhergehenden guten Abdichtung zwischen den Räumen ohne Mauerbohrungen nur selten machbar. Außerdem ist die Anzahl der Probenahmestellen durch den Probenahmemultiplexer auf 6 bis 8 Anschlüsse begrenzt. In diesem Falle bietet die Probenahme über Spritzen mit einer späteren Analyse über einen Gaschromatographen mit Electron Capture Detector (GC-ECD) viele praktische Vorteile.

Weiterhin ermöglicht die GC-ECD Analyse die Messung von Verdünnungsverhältnissen über 1:1.000.000, was für die Bewertung zum Arbeiten mit hochtoxischen Substanzen wie Phosgen, sehr wichtig ist.

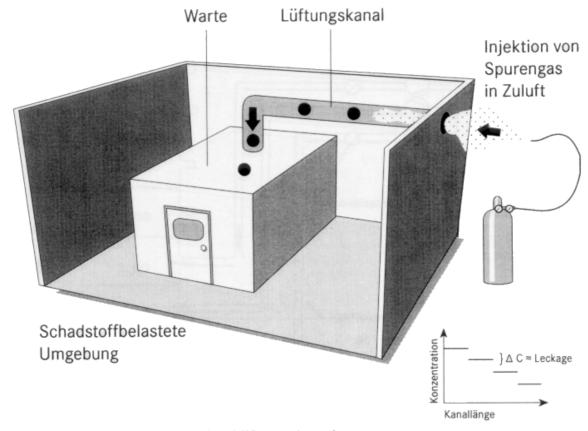
12 Dichtheit von Lüftungskanälen

Abb. 14 zeigt einen Lüftungskanal im Unterdruckbetrieb, welcher durch einen belasteten Raum oder durch einen im Störfall belasteten Raum in einen Arbeitsraum (Warte, Schutzraum, etc.) führt.

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de

TGmess_gesamt9.doc; 17.09.2002 Seite **23** von 36





Probennahme entlang des Lüftungskanals

Abb. 14: Leckagetest an einem Lüftungskanal im Unterdruckbetrieb

Undichtigkeiten in einem solchen Lüftungskanal können dann zu Problemen führen, wenn giftige Gase einströmen und Personen gefährden. Die Vorgehensweise zur Messung sieht so aus, daß in den Lüftungskanal vor Eintritt in den evtl. belasteten Raum ein konstanter Tracergasstrom injiziert wird. Undichtigkeiten entlang des Lüftungsrohres würden eine Verdünnung der Tracergaskonzentration zur Folge haben, welche man über mehrere Probenahmen über der Rohrlänge quantifizieren und auch z.T. lokalisieren kann.

13 Leckage zu Sicherheitsbereichen

Eine insbesondere in Kernkraftwerken und Laboratorien (Unterdruckhaltung) sowie in Krankenhäusern, Reinräumen, Schutzräumen (Überdruckhaltung) anzutreffende Situation ist die Frage der Dichtheit von sensiblen Räumen während des normalen Betriebs und im Störfall.

Tracergasmessungen haben immer wieder bewiesen, daß trotz Druckhaltung an Türen und positiven Rauchgasversuchsergebnissen Rückströmungen vorkommen.

Abb. 15 zeigt einen Kontrollraum (Warte) in einer möglicherweise belasteten Umgebung. Der Dichtigkeitstest wird durchgeführt, indem in der Umgebung der Warte das Tracergas in die Raumluft injiziert und innerhalb der Warte gemessen wird, wieviel von dem Tracergas dort ankommt.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 24 von 36



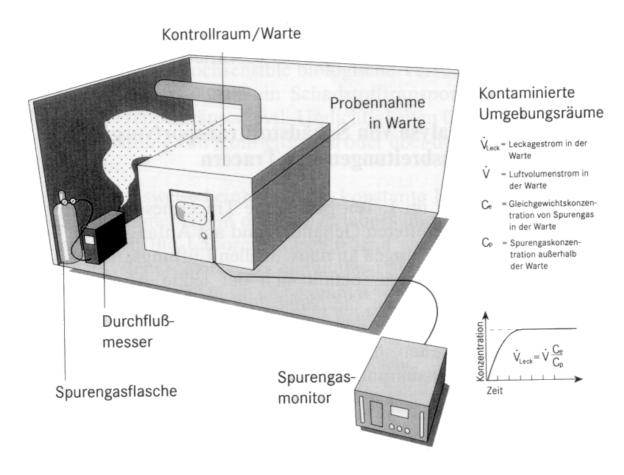


Abb. 15: Leckagetest an Sicherheitszentralen und Warten

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002

Über Messungen im Zuluftkanal zur Warte kann mit dieser Meßanordnung auch die Dichtheit des Lüftungskanals gemessen werden.

'Safe Haven' und 'Temporary Safe Haven'

Ein Safe Haven ist ein Raum, welcher bei einer Störfallsituation unabhängig von der Dauer einen vol-Ien Schutz für eine begrenzte Anzahl von Personen bietet. Safe Havens sind typischer Weise Kontrollräume, Warten, Leitzentralen, welche über besondere Zu- und Abluftsysteme verfügen und die Zufuhr sauberer Luft gewährleisten.

Der Temporary Safe Haven ist ein Raum, welcher nur für eine begrenzte Zeit Sicherheit für die Bewohner bietet. Viele Störfälle mit plötzlichen Schadgasemissionen sind von kurzer Dauer und schnell wieder unter Kontrolle (Abb. 16). Temporary Safe Havens dienen dazu, eine zeitlich begrenzte Zufluchtstätte zu sein, um sich auf eine spätere Evakuierung vorzubereiten. Sie geben den Rettungsdiensten mehr Zeit zur Durchführung ihrer Aufgaben. Damit das Konzept vom Temporary Safe Haven, z.B. auf dem Gelände einer Chemiefabrik oder auch in den nahegelegenen Wohngebieten, auch im Störfall greift, ist es äußerst wichtig zu wissen, welchen Schutz welches Gebäude oder welcher Raum in einem Gebäude bietet und welcher sich am besten als Notsammelstätte eignet. Die klare Ausweisung von Sammelstätten erleichtert die Evakuierung von Menschen.

Seite 25 von 36



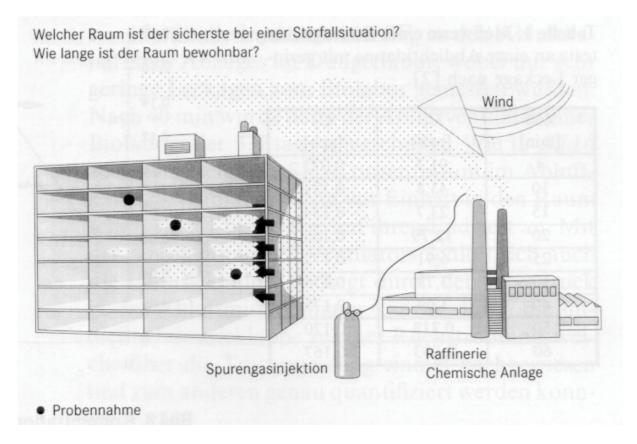


Abb. 16: Eine Möglichkeit zur Durchführung eines Temporary Safe Haven Tests

Viele Firmen haben bislang auf die Ausweisung von Temporary Safe Havens verzichtet, da es keine quantitative Bewertungsmöglichkeit gab. Mit der Tracergastechnik ist eine solche Bewertung möglich. Basierend auf Luftwechselmessungen lassen sich schon recht einfach und genau max. Aufenthaltszeiten für bestimmte Störfallsituationen berechnen. /9/ gibt ein auf Luftwechselmessungen aufgebautes Verfahren an. Abb. 16 zeigt grafisch eine andere Möglichkeit auf. Hier wird der Schadgasaustritt über eine Tracergasfreisetzung simukiert und der Anstieg in den umliegenden Gebäuden gemessen.

15 Dichtigkeit von Lagerstätten gefährlicher Güter oder belasteter Räume

Der umgekehrte Fall, wie in Kap. 13 beschrieben, tritt auf, wenn ein schadgasbelasteter Raum innerhalb eines Gebäudes liegt. Abb. 17 zeigt eine mögliche Anordnung.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite **26** von 36



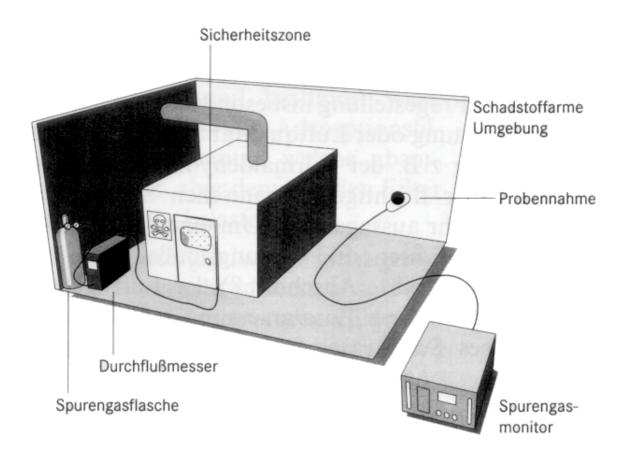


Abb. 17: Versuchsanordnung zur Dichtigkeitsmessung von Lagerstätten mit gefährlichen Gütern bzw. zur Durchführung von Abnahmen von Notlüftungssystemen

Das Tracergas wird hier mit konstantem Volumenstrom in den belasteten Raum injiziert. Die umliegenden Räume werden auf Anwesenheit von Tracergasmolekülen untersucht. In der Praxis werden fast immer Tracergasmoleküle in einem benachbarten Raum nachgewiesen, was bei einer Detektiergrenze mit Gaschromatograph und Electron Capture Detector von 10⁻¹² nicht verwundert. Wichtig ist die Festlegung einer max. Leckagerate bzw. eines max. Verdünnungsverhältnisses. Ist in dem be-

nachbarten Raum der Zuluftvolumenstrom \dot{V}_L bekannt, so läßt sich der Leckagestrom \dot{V}_{Leck} , quantifizieren:

$$\overset{\bullet}{V}_{Leck} = \frac{C_R}{C_{La}} \cdot \overset{\bullet}{V_L}$$
 Glg. 16

In Glg. 16 ist C_R die Konzentration an Tracergas im benachbarten Raum und C_{La} die Konzentration an Tracergas in der Lagerstätte, eine volständige Durchmischung in beiden Räumen vorausgesetzt.

Existieren Leckagepfade zu umliegenden Zonen, kann es gewünscht sein, daß Gefährdungspotential für Personen bei Freisetzung eines Schadgases abzuschätzen. Zu diesem Zweck werden an den interessierenden Stellen 'j' die Tracergaskonzentrationen $C_{R,j}$ gemessen und das Verdünnungsverhältnis $R_{v,j}$ entsprechend Glg. 17 bestimmt.

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX –29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



$$R_{v,j} = \frac{C_{R,j}}{C}$$
 Glg. 17

Mit diesem Verdünnungsverhältnis kann nun bei Kenntnis der real möglichen Schadgaskonzentration in der Lagerstätte C_{La} die Konzentration dieses Schadgases an jeder Stelle 'j' des Gebäudes bestimmt werden.

16 Test von Notlüftungssystemen

In vielen Produktionsstätten, insbesondere aber in der Halbleiterfertigung gibt es zusätzlich zur Raumoder Hallenbelüftung noch ein zusätzliches Lüftungssystem, welches im Falle eines Schadgasaustritts aktiviert wird. Durch eine effektive Absaugung der giftigen Gase oder Dämpfe soll das Notlüftungssystem zusätzlichen Schutz für das Bedienungspersonal sicherstellen. Aktiviert wird das Notlüftungssystem in der Regel über Gassensoren. Die Meßzyklen dieser Sensoren sowie deren Sensitivität und Ansprechverhalten sind maßgebend für eine sichere und schnelle Detektion einer Leckage. Das Zeitintervall zwischen erstmaligem Gasaustritt und Aktivierung des Notlüftungssystems kann bei Fehlplanung oder Mängeln schon beträchtliche Gefährdungen des Personals ergeben.

In der Halbleiterfertigung werden diese Notlüftungssysteme meist nach Spezifikation des Herstellers oder aufgrund theoretischer Überlegungen ausgelegt. Bevor es die Tracergastechnik gab, war ein Test solcher Systeme unter realen Betriebsbedingungen nicht durchführbar. In den USA und auch in England werden Tracergastests zur Abnahme und zur jährlichen Überprüfung verlangt. Der Testaufbau ist identisch mit dem in Abb. 17. In dem Raum, aus welchem Schadgase im Falle einer Leckage austreten könnten, wird eine definierte Tracergasmenge injiziert. In den umliegenden Räumen oder Raumzonen, insbesondere in der Nähe von Arbeitsplätzen und Gassensoren wird die Luft auf die Ankunftszeit des Tracergases und seiner stationären Konzentration analysiert. Mit Hilfe der Verhältnisanalyse läßt sich dann auf die wirkliche Schadgaskonzentration eines Gefahrstoffes im Störfall schließen. Diese erfolgt analog zu Glg. 17

$$R_{Umgebung,j} = \frac{C_{Umgebung,j}}{C_{Injektionsort}}$$
 Glg. 18

 $R_{Umgebung,j}$ = Verdünnungsverhältnis an der Stelle j

 $C_{Umgebung,j}$ = Tracergaskonzentration in der Umgebung an der Stelle j

C_{Iniektionsort} = Tracergaskonzentration in der injizierten Zone

Das Verdünnungsverhältnis, $R_{Umgebung}$, läßt sich direkt in eine äquivalente Schadgaskonzentration umrechnen. Bei dem von Orcutt /10/ durchgeführten Test an einem 'Chemischen Dampfphasenabscheider' überschritten die äquivalenten Schadgaskonzentrationen deutlich die erlaubten Grenzwerte. Für neue Anlagen ist es heute vorgeschrieben, sie nach der Prüfvorschrift SEMI Standard S2-93 /11/ abzunehmen.

17 Positionierung von Gaswarnsensoren und Identifikation sicherer Fluchtwege

Ein Tracergas kann auch dazu benutzt werden, den Strömungspfad eines Schadgases durch ein Gebäude zu ermitten. An der Stelle im Gebäude, wo ein evtl. Schadgasaustritt vermutet wird, läßt man



das Tracergas ausströmen. Über ein Netz von Probenahmestellen im Gebäude können nun die Transportwege nachvollzogen werden. Abb. 18 zeigt den Grundriß eines Produktionsgebäudes der chemischen Industrie bei mech. Lüftung mit hohen Volumenströmen und erzwungener Strömungsrichtung /12/. Die größte Gefahr für eine Schadgasfreisetzung wurde hier in dem Raum mit dem Beförderungszulieferband vermutet. Hier wurde nun ein konstanter Tracergasvolumenstrom emittiert und Tracergaskonzentrationen in den umgebenden Räumen gemessen. Die Pfeile geben die Strömungsrichtung an, wie sie sich aus den Tracergasmessungen ergaben.

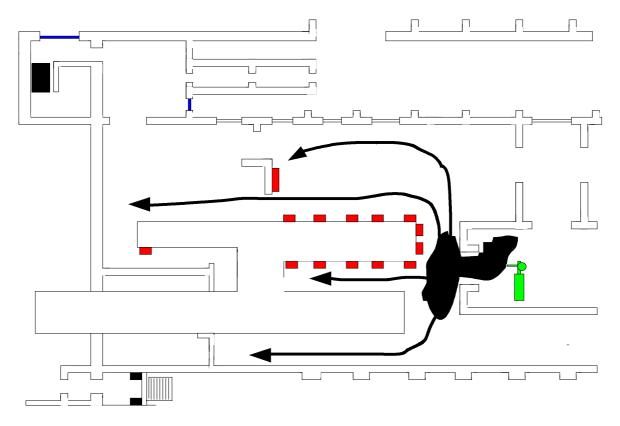


Abb. 18: Strömungspfadsuche mit Tracergasen in einer chemischen Produktionsanlage

Diese Meßmethode ermöglicht das schnelle Aufspüren von Totzonen, welche nicht von der aufgezwungenen Strömung erfaßt werden. Weiterhin lassen sich Schadgaskonzentrationen nach Ort, Zeit und Größe leicht ermitteln. Ebenso ermöglichen sie die optimale Plazierung von Gaswarngeräten.

Eine weitere Anwendung besteht in der Bestimmung von Transportzeiten von der Austrittsquelle des Schadgases z. B. zur Bewertung von Fluchtwegen.

Die beiden letzten Gründe treffen auch auf die Anbringung von Rauchsensoren und die Festlegung von Fluchtwegen im Brandfall zu.

In dem o. g. Beispiel wurde der Transport des Tracergases ausschließlich über die starke Lüftungsanlage bestimmt. Die Dichte des Schadgases und auch der des Tracergases und der Austrittimpuls bei der Injektion spielten eine sehr untergeordnete Rolle.

Ist z.B. die Dichte des Schadgases maßgebend für die Ausbreitung, so sollte auch das verwendete Tracergas eine ähnliche Dichte aufweisen. Aufgrund der hohen Nachweisbarkeit von SF₆ kann man



dieses mit einem anderen Gas in sehr weiten Verhältnissen mischen und verdünnen, so daß hier ein repräsentativer Test möglich ist.

18 Suche nach einer Schadgasquelle

Sowohl innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden kommt es vor, daß Leckagen über Warngeräte detektiert werden, aber die Quellenidentifikation unklar ist. Kommen mehrere Verursacher innerhalb eines Gebäudes als mögliche Quelle in Betracht, bietet sich die Verwendung von verschiedenen Tracergasen gleichzeitig an, Abb. 19.

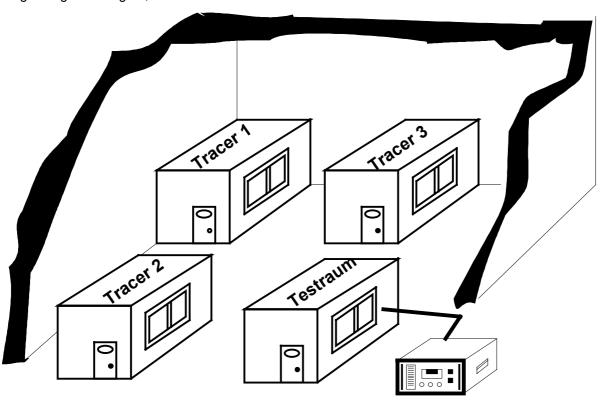


Abb. 19: Identifikation einer Schadgasemissionsquelle unter Verwendung mehrerer Tracergase

Insbesondere in der freien Atmosphäre gibt es häufig Streitfälle, wo die Verursacher nicht klar zu identifizieren sind.

19 Bestimmung der Quellstärke eines Schadgases

Wichtig ist diese Fragestellung insbesondere bei Messungen der Luftbelastung oder Luftqualität in Räumen. Die alleinige Messung z. B. der Formaldehydkonzentration oder Summe aller flüchtigen organischen Substanzen (VOC) ist nicht sehr aussagefähig. Um eine qualifizierte Beratung durchzuführen und Lösungsmaßnahmen zu bewerten, ist der Luftwechsel mitzumessen. Über diese Zusatzmessung läßt sich die Quellstärke eines Schadgases folgendermaßen bestimmen:

$$\dot{V}_{SG,i} = \dot{V}_{zu} \cdot \Delta C_{SG,i}$$
 Glg. 19

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX -29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



Hierbei ist

 $\Delta C_{_{\rm SGi}}$ = Konzentrationsdifferenz zwischen innen und außen des Schadgases (SG) der

Komponente 'i'

 \dot{V}_{sgi} = Quellstärke des Schadgases i'

 \dot{V}_{zz} = in den Raum eintretender Frischluftvolumenstrom

 $\Delta C_{\text{SG,i}}$ wird für alle interessierenden Schadstoffe gemessen. Der Frischluftvolumenstrom \dot{V}_{zu} ergibt sich aus der Messung des Außenluftwechsels n_a über

$$\dot{V}_{zu} = \mathbf{n}_{a} \cdot \mathbf{V}_{R}$$
 Glg. 20

 n_a = Außenluftwechsel

 V_R = Raumvolumen

Emissionen aus Baumaterialien müssen nicht konstant sein, sondern können sich mit der Raumtemperatur, -feuchte und auch mit dem Luftwechsel ändern. Ggf. sind mehrere, parallele Luftqualitäts- und Luftwechselmessungen nötig, um die Abhängigkeit der Quellstärke von den jeweiligen Parametern zu ermitteln.

20 Einbauüberprüfung von Adsorptionsfiltern auf Sitzdichtigkeit

Ein Adsorptionsfilter kann noch so gut und effizient sein, wenn es Leckagestellen am Rahmen gibt, wird er sehr schnell ineffizient. Analog zum Test von Hepa-Filtern mit Aerosolen oder Partikel, wo über eine Messung vor und hinter dem Filter ein Abscheidegrad bestimmt wird, werden zum Test von Adsorptionsfiltern Tracergase benutzt, welche adsorbiert werden aber dennoch den Filter nicht negativ belasten.

 SF_6 als Tracergas ist hier nicht geeignet, da es gar nicht adsorbiert wird. In Gebrauch waren bislang chlorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) wie R-11 oder R-112 bzw. R-112A. Da FCKW maßgeblich an der Zerstörung der Ozonschicht beteiligt sind, sollten sie, obwohl relativ gesehen, nur kleine Mengen freigesetzt werden, nicht weiter benutzt werden. Besser als FCKW eignen sich die schon angesprochenen Perfluorocarbon Tracergase (PFT). PFT sind umweltfreundlicher, erfüllen nahezu alle Eigenschaften eines idealen Tracergases und besitzen ein besseres Absorptionsverhalten gegenüber Aktivkohle als FCKW bei geringerem Feuchteeinfluß /13/.

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 31 von 36



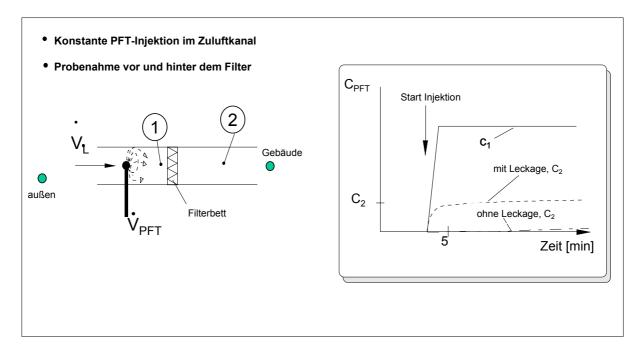


Abb. 20: Versuchsaufbau zum Test von Adsorptionsfilterbetten

Abb. 20 zeigt den Testaufbau. In ausreichender Entfernung vor dem Filterbett wird ein konstanter Volumenstrom eines mit Luft oder N_2 verdünnten Tracergases emittiert, so daß das gesamte Bett über den Querschnitt mit einer homogenen Tracergaskonzentration beaufschlagt wird. In ausreichender Entfernung hinter dem Filterbett wird ebenfalls eine Probenahmestelle eingerichtet. Gemessen werden die Tracergaskonzentrationen über ca 5 Minuten. Aus den Mittelwerten der Tracergaskonzentration vor und hinter dem Filter wird der Durchlässigkeitsgrad D berechnet zu

$$D = \frac{c_1}{c_2} \cdot 100 \text{ in } \%$$
 Glg. 21

 c_1 = Tracergaskonzentration vor dem Filter

 c_2 = Tracergaskonzentration nach dem Filter

In USA werden diese Tests für Adsorptionsfilter nach der Vorschrift ANSI/ASME N510-1980 /14/ durchgeführt.

21 Überprüfung der Keimausbreitung in Krankenhäusern mit Tracergasen

In Krankenhäusern soll über eine Überdruckhaltung in den Operationsräumen ein Einströmen oder auch Zurückströmen von Keimen verhindert werden. Isolier- und Intensivstationen verfügen über eine gute Absaugung und eine Rückströmung von Keimen oder eine Übertragung in andere Räume sollte nicht stattfinden. In /15/ wurde nachgewiesen, daß sich Tuberkolose Bazillen bedingt durch den Turbulenzgrad der Raumluftströmung in der gleichen Weise ausbreiten wie SF $_6$ -Moleküle.

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de

Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik

Folgende Tracergasverfahren und Meßschritte bieten sich an, um die einwandfreie Funktion von z.B. Isolierstationen zu überprüfen:

- 1. Nachweis der vorgeschriebenen Frischluftrate
- 2. Nachweis einer guten Keimabsaugung innerhalb des Raumes (Totzonen)
- 3. Quantifizierung der Rückströmung von Keimen in den Meßraum
- 4. Quantifizierung der Überströmung in angrenzende Räume.

Zu 1 und 2:

Zum Nachweis der vorgeschriebenen Frischluftrate wurde schon in Kap. 6 etwas gesagt. Eine für Räume in Krankenhäusern sinnvolle Vorgehensweise aufgrund der höheren Luftwechselzahlen ($n\approx6~h^{-1}$) ist, zunächst einen konstanten Tracergasstrom in den Zuluftkanal zu injizieren und zu warten, bis sich eine stationäre Konzentration im Raum eingestellt hat. Über die hier nochmals wiedergegebene Glg. 1 ergibt sich die Frischluftrate.

$$\dot{V_L} = \frac{\dot{V}_T \cdot c_T}{c_2 - c_1}$$
 Glg. 1

 \dot{V}_{l} = zu messender Luftvolumenstrom

 \dot{V}_{T} = Volumenstrom des reinen oder verdünnten Tracers

 c_T = Konzentration des injizierten Tracergases; bei Verwendung von reinem Tracergas ist c_T = 1

 c_1 = Tracergaskonzentration stromaufwärts vor der Injektionsstelle

 c_2 = Tracergaskonzentration stromabwärts hinter der Injektionsstelle

Über die Probenahme an mehreren Stellen im Raum lassen sich bei zeitlich verzögerten Konzentrationsanstiegen Aussagen über die Verteilung der Frischluft im Raum und damit über gut und schlecht belüftete Zonen machen, siehe hierzu auch das Thema Lüftungseffektivität, Lokales Alter der Luft in /16/.

Nach Durchführung dieses sogenannten Step-up Tests wird die Tracergasinjektion abgeschaltet und der Konzentrationsabfall wiederum an mehreren Stellen gemessen. Über eine lineare Regression der Konzentrationswerte an Glg. 21 ergibt sich hieraus die Luftwechselrate n.

$$\mathbf{c}(t) = \mathbf{c}_{\circ} \cdot \mathbf{e}^{-nt}$$
 Glg. 22

Graphisch dargestellt entspricht die Luftwechselzahl n der Steigung der Geraden bei logarithmischer Auftragung des Konzentrationsabfalls über der Zeit. n ergibt sich hiernach aus Glg. 22 zu

$$n = \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{\Delta t}$$
 Glg. 23

TGmess gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite 33 von 36



Aus der Multiplikation der Luftwechselzahl n mit dem Raumvolumen V_R ergibt sich die Frischluftrate V_L zu

$$\dot{V}_L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{p}}$$
 Glg. 24

Der Vergleich der Frischluftrate vom Step-up Test mit der vom Decay-Test ermöglicht Aussagen über die Qualität der Messung.

Mit dieser Testdurchführung wurde einmal die Frischluftrate bestimmt und dann die Luftverteilung respektive die Keimausbreitung im Raum quantifiziert.

Zu 3

Zur Untersuchung des Wiedereintritts von Keimen in die zu untersuchende Isolierstation wird das Tracergas in den Abluftkanal injiziert und die Isolierstation auf Vorhandensein von Tracergasmolekülen untersucht, vergl. Kap. 8.3, Wiedereintritt von Fortluft ins Gebäude.

Zu 4

Die keimdichte Abgeschlossenheit der Isolierstation gegenüber anderen Räumen im Krankenhaus wird über den Dichtigkeitstest durchgeführt, siehe auch Kap. 15, indem das Tracergas in der Isolierstation freigesetzt wird und die umgebenden Räume auf das Vorhandensein von Tracergasmolekülen untersucht werden. Bei längerer Injektion während des Step-up Tests läßt sich durch gleichzeitige Probennahme in den umgebenden Räumen diese Überprüfung gleich miterledigen.

Ist der Zuluftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{\tiny Nebenraum}}$ der zu überprüfenden Nebenräume bekannt, so ergibt sich die Leckrate $\dot{V}_{\text{\tiny Leck}}$ zu

$$\dot{V}_{\text{\tiny Leck}} = \frac{\mathbf{C}_{\text{\tiny Nebenraum}}}{\mathbf{C}_{\text{\tiny Icoliorstation}}} \cdot \dot{V}_{\text{\tiny Nebenraum}}$$
 Glg. 25

Zur Quantifizierung des Gefährdungspotentials reicht häufig das Verdünnungsverhältnis *R* zwischen der Isolierstation und den Nebenräumen aus.

$$R = \frac{C_{\text{Nebenraum}}}{C_{\text{Isolierstation}}}$$
 Glg. 26

22 Diskussion

Die hier dargestellten Tracergasmeßverfahren geben einen ersten Einblick in die vielfältigen Möglichkeiten von Untersuchungen, die mit dem Einsatz von Tracergasen machbar sind. Die Qualität der Ergebnisse sind häufig weit besser, als sie mit anderen Meßmethoden erzieltbar sind. Häufig gibt es auch keine alternativen Meßmethoden, um die entsprechenden Aussagen machen zu können.

Aus Umweltgründen ist die Emission von Tracergasen auf ein Minimum zu beschränken. Deshalb ist es wichtig, sehr geringe Konzentrationen genau messen zu können. Hierzu wurde der AUTOTRAC 101 als spezieller Tracergasmonitor entwickelt, der sowohl stationär im Labor als auch im Feldversuch oder mobil eingesetzt werden kann.

TRACERTECH GMBH, Hardtstr. 19, D-88090 Immenstaad, Tel.: +49-(0)7545-9411-0; FAX -29

Internet: www.tracertech.de, Email: service@tracertech.de



Bei Messungen in bewohnten Räumen muß eine gesundheitliche Beeinträchtigung der Bewohner in jedem Falle sicher ausgeschlossen sein. Auch deswegen sind geringe Konzentrationen äußerst wichtig. Das Tracergas Schwefelhexafluorid, SF6, und Perfluorocarbontracer erfüllen diese Eigenschaften.

Die Injektion und Probenahme über Plastikspritzen und die anschließende Analyse bei der TRA-CERTECH GmbH ermöglicht jedem Anwender, ohne eigene Investitionen selber Tracergasmessungen durchzuführen und so eine höherwertige Dienstleistung sei es als Gutachter oder als Beratender Ingenieur zu erbringen.

23 Literatur

- /1/ Lester, D; Greenberg, L.A.: The Toxicity of sulfur hexafluoride, Arch. Ind. Hyg. Occup. Med., Bd. 2, 1950, S. 348-349
- /2/ N.N: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte, Mitteilung XXII der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, 1986, ISBN 3-527-27353-0
- /3/ N.N.: VDI 4300, Blatt 7, Messung von Innenluftverunreinigungen, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, Ausgabe Juli 2001, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5, zu beziehen durch Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- /4/ Raatschen, W: Was ist Lüftungseffektivität?, KI 5,6,7-8,1988
- /5/ Roulet, C.A.; Vandaele L. (eds): Measurement Techniques related to Air Flow Patterns within Buildings, Application Guide, IEA (International Energy Agency- Annex XX report), Lausanne, Oct. 1990, AIVC Publication TN 34
- Charlesworth, P.S.: Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques, Publ. of Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwich Science Park, Barclays Venture Centre, Sir William Lyons Road, Coventry, CV47EZ, England
- 171 Lagus, P.L; Flanagan, B.S.; Peterson, M.E.; Clowney, S.L.: Tracer dilution method indicates flowrate through compressor, Feb. 25, 1991, Oil&Gas Journal 35
- /8/ Lagus, P.L.: Ventilation System Performance Testing using Tracer Gases, Lagus Applied Technology Ltd, Firmenschrift vom 28. Jan. 1993, LAT = Lagus Applied Technology Ltd, 11760 Sorrento Valley Road, Suite M, San Diego, California 92121
- /9/ Jann, P.: Evaluation of Temporary Safe Havens, J. Loss Prev. Process Ind. Vol 2,33-38 (1989)
- /10/ Orcutt, J.J.: Characterization of Hazardous-Gas Release by Tracer-Gas Simulation, aus: Hazardous Assessment and Control Technology in Semi Conductor Manufacturing, ACGIH, Cincinnati, Ohio, 1988
- /11/ **SEMI S2-93:** Safety Guidelines for Semiconductor Manufacturing Equipment, SEMI Semiconductor Equipment and Materials International, 805 East Middlefield Road, Mountain View, CA 94043-4080



Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik

- /12/ **Grot, R.A.; Lagus, P.L.:** Application of Tracer Gas Analysis to Industrial Hygiene Investigation; Industrial Hygiene News, May 1991
- /13/ Pearson, J.R.; Fleming, K.M.; Hunt, J.R.; Lagus, P.L.: Replacement Tracer Agents for the In-Place Testing of Adsorbers in Nats, 22nd DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference, Denver, Colorado, August 24-27, 1992
- /14/ ANSI/ASME N510-1980: Testing of Nuclear Air-Cleaning Systems, veröffentlicht bei: The American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, 345 East 47th Street, New York, N.Y. 10017, USA
- /15/ Lagus, P.L.; Grot, R.A.: Application of Tracer Gas Analysis to the Prevention of Tuberculosis Transmission in Health Care Facilities, eingereicht zur Veröffentlichung von LAT,1994; LAT = Lagus Applied Technology Ltd, 11760 Sorrento Valley Road, Suite M, San Diego, California 92121
- /16/ Raatschen, W.: Was ist Lüftungseffektivität, KI 5,6,7-8/88

TGmess_gesamt9.doc: 17.09.2002 Seite **36** von 36