

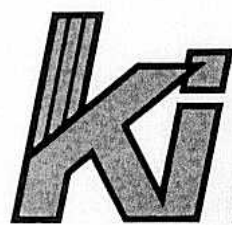
DORNIER

Dornier System GmbH · Neue Technologien · Energietechnik und Raumklima
Postfach 1360
D-7990 Friedrichshafen 1

Was ist Lüftungseffektivität?

Willigert Raatschen

Sonderdruck aus



**Klima Kälte
Heizung**

*Fachzeitschrift für Technische Gebäudeausrüstung:
Klima, Kälte, Lüftung, Heizung, Energie*

Heft 5/6/7-8/88 · Verlag C.F. Müller · Karlsruhe

Die Arbeiten wurden von der Projektleitung Biologie, Ökologie und Energie (PBE) in der KFA Jülich GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert. Sie entstanden im Rahmen des Projektes "Annex 18, Demand Controlled Ventilating Systems" der Internationalen Energie-Agentur (IEA).



Willigert Raatschen:

Was ist Lüftungseffektivität?

1. Teil*

In diesem Sonderdruck sind die 3 Teile einer Veröffentlichung zusammengestellt, die nacheinander mit dem gleichlautenden Titel in den Heften 5, 6 und 7/8 (1988) der *Klima Kälte Heizung* erschienen sind.

Die Artikelserie stellt eine Zusammenfassung von im wesentlichen ausländischer Literatur zum Thema Luftwechsel, Lüftungswirkungsgrad und Lüftungswirksamkeit dar. Es werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit im ersten Teil die unterschiedlichen Meßtechniken für Luftwechselmessungen mit Spurengasen für Einzonen- und Mehrzonengebäude erläutert und soweit möglich an Beispielen erklärt.

Der zweite Teil beinhaltet die theoretischen Grundlagen zum Verständnis der Begriffe „Alter der Luft“ und „Luftaustauschwirkungsgrad“, welche das Strömungsverhalten der Luft im Raum und damit die Güte des Luftaustausches charakterisieren. Am Beispiel der Spurengasabklingmethode werden die Begriffe erläutert und an Versuchsprotokollen vertieft.

Im dritten Teil werden die Spurengasmeßmethode mit konstanter Konzentration sowie die Puls-Methode erläutert und durch Beispiele untermauert. Der Schluß behandelt die Abfuhr von Schadstoffen aus dem Raum und die sich hierzu eingebürgerten Definitionen wie „Lüftungswirkungsgrad“ und „Schadstoffabfuhrwirkungsgrad“.

What is ventilation efficiency

The first of this three-part series gives a bibliography and review about methods for measuring air exchange rates of rooms, in between rooms and of whole buildings. Included are diverse tracer-gas methods as well as pressurization methods. Whenever possible, the methods are illustrated by examples. The insufficiency of the nominal air exchange rate to predict exposure to contaminants is discussed.

The second part deals with the efficiency for the air exchange in rooms. The „age concept“ and the „air exchange efficiency“ is explained for the application with the tracer-gas decay method. A practice example of a tracer-gas measurement is given to deepen the theory.

The third part explains the constant-concentration and the pulse method and definitions to characterize the removal of contaminants.

Efficacité de la ventilation, c'est quoi?

La présente série d'articles comprend trois parties, qui résument surtout des publications de source étrangère, ayant pour objet le renouvellement d'air, le coefficient d'utilisation de la ventilation, ainsi que le coefficient d'efficacité de la ventilation. Sans que cette étude soit exhaustive, la première partie porte sur les différentes méthodes de mesure du renouvellement d'air par le biais de gaz traceurs pour bâtiments à une seule cellule, respectivement pour bâtiments à plusieurs cellules interconnectées. Dans la mesure où cela était possible, les méthodes sont démontrées moyennant des exemples.

La deuxième partie porte sur les bases théoriques, permettant de mieux comprendre des notions telles que „l'âge de l'air“ et „le coefficient d'efficacité du renouvellement d'air“, qui elles caractérisent la circulation de l'air dans l'espace et la qualité du renouvellement d'air. L'exemple de la méthode de dissipation du gaz traceur permet de définir ces notions, ce qui est encore approfondi à l'aide de procès-verbaux d'essais.

La troisième partie traite de la méthode de mesure, permettant de déterminer la concentration constante du gaz traceur, ainsi que de la méthode basée sur l'étude des effets d'un gaz traceur injecté dans la ventilation, les deux méthodes étant validées par des exemples respectifs. La dernière partie porte sur l'évacuation d'éléments polluants de l'espace et sur les définitions qui s'emploient couramment dans ce contexte, telles que „coefficient d'efficacité de la ventilation“ et „coefficient d'efficacité de l'évacuation d'éléments polluants“.

1. Einleitung

Insbesondere internationale Tagungen wie im vergangenen Jahr die „Indoor Air '87“ in Berlin, die „ICBEM“ in Lausanne (CH) und die „8th AIVC Conference“ in Überlingen machten den deutschen Teilnehmern klar, daß einige Definitionen zur Charakterisierung eines Lüftungssystems in Ländern wie Schweden, Norwegen, Finnland, Dänemark, USA, Kanada und England zum festen Bestandteil des Wortschatzes eines Lüftungsingenieurs und -planers gehören. In Deutschland nimmt man diese Entwicklung erstaunt zur Kenntnis, ohne daß allerdings große Bestrebungen erkennbar sind, die im Ausland gewonnenen Erfahrungen in die deutsche Praxis einzubringen. Gründe hierfür sind:

- daß in den letzten sechs bis sieben Jahren verwirrend viele unterschiedliche Definitionen und Kenngrößen kreiert worden sind, von denen viele unbrauchbar sind;
- andere Definitionen müssen sich noch durchsetzen;
- häufig sind Autoren bei ihrer Wort- und Symbolwahl und Indizierung nicht konsequent;
- die meisten Veröffentlichungen sind in englischer oder skandinavischer Sprache;
- die Publikationen sind in vielen Fällen so geschrieben, daß sie

für den planenden Ingenieur ohne weitergehendes Literaturstudium nur schwer zu verstehen sind, zumal hierbei für Praktiker völlig neue Denk- und Arbeitsmethoden vorgestellt werden.

Ziel dieser Veröffentlichungsreihe ist es, den deutschen Lüftungsingenieuren nicht nur die Theorie von Spurengasmessungen zu vermitteln, sondern auch die Meßbarkeit und Zweckmäßigkeit der einzelnen Kenngrößen zu veranschaulichen und an praktischen Beispielen zu erläutern. Der Literaturübersicht in der „Technical Note Nr. 21“ (TN 21) von Liddament, 1987, kann man leicht entnehmen, wie groß der deutsche Beitrag zu dieser Problematik ist. Aus den insgesamt 49 Literaturzitaten zu diesem Thema kommt nur ein Beitrag aus der BRD, allerdings 27 aus den skandinavischen Ländern und 14 aus den Vereinigten Staaten. Einige sehr gute Veröffentlichungen liegen leider nur in den skandinavischen Sprachen vor, was die Zugänglichkeit in die deutsche Fachwelt erschwert.

Der Aufsatz ist so gegliedert, daß im Teil I Allgemeines zur Durchströmung von Gebäuden diskutiert wird und verschiedene Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels erläutert werden. Der zweite Teil erklärt die theoretischen Grundlagen zum Auswerten von Spurengasmessungen anhand der Spurengas-Abklingmethode. Hierbei wird insbesondere das Konzept vom „Alter der Luft“ und der „Luftaustauschwirkungsgrad“ diskutiert. Im dritten Teil wird die Einspritzmethode und die Spurengasmethode mit

* Manuskript eingereicht im März 1988

konst. Volumenstrom beschrieben und auf weitere Kennzahlen zur Charakterisierung der Schadstoffabfuhr eingegangen.

Die TN 21 gibt in einer 50seitigen Broschüre einmal eine Literaturübersicht über alle Definitionen, welche bislang veröffentlicht und diskutiert worden sind. Es ist eine Zusammenstellung von Definitionen ohne weitreichende Erklärungen, die Erläuterungen zu den Kenngrößen und der Bezug zur Messung sind sehr knapp gehalten.

Dieser Beitrag hier soll einige am häufigsten gebrauchte Parameter zur Beschreibung des Lüftungsverhaltens eines Lüftungssystems erklären. Darüber hinaus wird der Bezug zur Praxis hergestellt, indem aufgezeigt wird, wie diese Parameter gemessen werden können, was sie aussagen und welche Vor- und Nachteile bei der Messung als auch bei der Charakterisierung des Lüftungssystems vorhanden sind. Um dem im englischen Fachvokabular nicht so bewanderten Leser eine bessere Vorstellung vom jeweiligen Parameter zu geben, ist der Versuch gemacht worden, äquivalente deutsche Wörter für englische Fachausdrücke zu finden. Um Zweideutigkeiten in der Übersetzung zu vermeiden, ist der in der Originalliteratur verwendete englische Ausdruck mitangegeben. Bei den Formelzeichen werden bei bekannten physikalischen Größen die dem deutschen Leser geläufigen Symbole verwendet, bei neuen Kenngrößen werden die international eingebürgerten Zeichen benutzt.

2. Luftwechsel

2.1 Die Luftwechselzahl

Die Hauptaufgabe der Lüftung in bezug auf die Bewohner ist, alte, verbrauchte Luft in der Aufenthaltszone und in den Raum emittierte Schadstoffe durch frische, unverbrauchte Luft so schnell und effizient wie möglich zu ersetzen.

Bislang wurde in Deutschland zur Charakterisierung des Luftaustausches im Raum die „globale“ Luftwechselzahl n (nominal air exchange rate oder nominal exchange frequency) benutzt, wobei

$$n = \frac{\dot{V}_L}{V_{RA}} \quad (1)$$

$\dot{V}_L$ der Gesamtluftvolumenstrom (nominal air flow rate) und V_{RA} das gesamte Raumvolumen ist. Vereinfacht wird hierbei die Dichte des ein- und austretenden Luftstromes gleichgesetzt. Für die weitere Terminologie ist der Begriff „globale Luftwechselzahl“ (bei uns bislang immer nur „Luftwechselzahl“ genannt) von Bedeutung, da dieser nur beschreibt, was global an Luft in einen ganzen Raum ein- und wieder austritt. Die Luftwechselzahl wird als Durchschnittswert für Räume und sogar gesamte Gebäude diskutiert, wobei angenommen wird, daß sich der Raum/das Gebäude wie ein vollständig durchmischtes Volumen verhält. Früher war das Ziel, die Größe der Infiltration¹ und des Luftwechsels zur Durchführung der Energiebilanz zu bestimmen. Deshalb konnte man es auch akzeptieren, das Haus als Ganzes zu betrachten. Bei den üblichen Ungenauigkeiten von Energiebedarfsberechnungen wirkten sich auch Ungenauigkeiten beim Luftwechsel nicht so stark aus.

Als aber die Zeit kam, in welcher sich die Bewohner über die Güte der Raumluft beklagten, nahm man wiederum die globale Luftwechselzahl als Maß für die Risikoabschätzung, wenn Bewohner Schadstoffen ausgesetzt sind. Insbesondere bei Gebäuden mit natürlicher Lüftung unterliegt der Luftwechsel großen zeitlichen und örtlichen Schwankungen. Ein Mittelwert der Luftwechselzahl eignet sich deshalb nicht für eine Risikoabschätzung.

¹ Infiltration ist das unkontrollierte Einströmen von Luft durch Schlitz, Risse und Fugen in beliebigen Gebäudeteilen, Fenster und Türen eingeschlossen. Bewirkt wird das Einströmen durch Winddruck und/oder durch temperaturbedingte Dichteunterschiede zwischen innen und außen. Die Infiltration ist ein Teil des Luftwechsels.

Die globale Luftwechselzahl stellt deshalb keine befriedigende Kenngröße dar, um die Lüfterneuerung und Luftqualität im Raum zu beschreiben. Diese hängen im wesentlichen vom Strömungsmuster der Luft (air flow pattern) im Raum ab. Insbesondere bei mechanischen Lüftungssystemen ist eine vollständige Durchmischung häufig nicht vorhanden (Maldonado u. a., 1983). Eine neue Kenngröße hat aber nur Sinn, wenn sie

- aussagekräftig
- leicht meßbar und
- reproduzierbar ist und
- sich Regeln für eine effizientere Lüftung hieraus ableiten lassen.

Der Kehrwert der globalen Luftwechselzahl n ist eine Zeitkonstante, welche wir mit nominaler Zeitkonstante τ_n (transit time or nominal time constant) bezeichnen wollen.

$$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} \quad (2)$$

Die nominale Zeitkonstante τ_n bezieht sich immer auf den ganzen Raum.

Um eine bessere Beschreibung des Lüftungsverhaltens (ventilation performance) zu bekommen, wurden in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen.

2.2 Luftwechselmessungen

Zur Abschätzung der Raumluftqualität, zur Aufstellung von Energiebilanzen und evtl. zu Aussagen über die Behaglichkeit ist die Kenntnis des Luftwechsels wichtig. Der Luftwechsel eines Raumes oder ein durchschnittlicher Luftwechsel eines gesamten Gebäudes macht keine Aussagen über Luftströme im Gebäude (z. B. von Raum zu Raum, zwischen den Etagen), was gerade bei Betrachtungen zur Raumluftqualität von Bedeutung ist.

Bei Gebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen sind in der Regel die zu- oder abgeführten Luftvolumenströme bekannt und somit auch der Luftwechsel. Hier stellt sich häufig dann die Frage nach der besten und effektivsten Luftführung, um die Aufenthaltszone mit frischer Luft zu versorgen, Unbehaglichkeitserscheinungen zu vermeiden und Energie zu sparen. An dieser Stelle sei vorweggesagt, daß die Zufuhr von frischer Luft und die Abfuhr von Schadstoffen grundsätzlich verschieden sind und begrifflich nicht vermischt werden sollten.

In Deutschland herrschen gerade im Wohnhausbereich Gebäude mit natürlicher Lüftung vor. Der Luftaustausch erfolgt mehr oder weniger unkontrolliert über Fensterfugen, Türschlitze und evtl. Abluftschächte. Er hängt von den treibenden Kräften (Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen, Winddruckverteilung an den Fassaden) ab. Außerdem findet hier ein Luftaustausch zwischen einzelnen Räumen statt.

2.2.1 Luftwechselmessungen nach der Abklingmethode für einzelne Zonen

Um den Luftwechsel zu messen, bedient man sich häufig sogenannter Spurengase (tracer gases). Hierbei handelt es sich um bestimmte ungefährliche Gase, welche je nach Methode und vorhandenem Lüftungssystem entweder der „eintretenden neuen“ Luft oder der „alten“ Luft beigemischt werden, um über eine Konzentrationsmessung den Luftaustausch zu bestimmen.

Bei der Spurengas-Abklingmethode („tracer gas decay method, step-down or washout method or dilution method“ genannt, Begriffe die alle die gleiche Methode bezeichnen; umfassende Literaturübersicht in TN 22 des Air Infiltration and Ventilation Centre, AIVC) wird in der betrachteten Zone ein Spurengas versprüht. Mit Ventilatoren wird das Spurengas in der Zone verwirbelt und verteilt, bis eine einheitliche Konzentration an allen Stellen des Raumes vorherrscht. Nach Abschalten der Ventilatoren zur Zeit $t = 0$ beginnt der Meßvorgang. Die Kenntnis der

absolut eingespritzten Menge von Spurengas in den Raum ist nicht notwendig. Die eingespritzte Menge hängt von der benutzten Gassorte ab und vom Konzentrationsbereich, welcher das Gasanalysegerät noch gut auflösen kann. Aufgrund eindringender Luft von außen oder aus anderen Zonen in die Meßzone findet jetzt ein Verdünnungsprozeß des Spurengases statt. Das Abklingen der Konzentrationen mit der Zeit wird gemessen.

Die Abklingmethode gibt keine Auskunft über die Luftverteilung in der Meßzone. Es muß zu jeder Zeit gewährleistet sein (notfalls mit Hilfe von Luftumwälzgeräten), daß die Meßzone wie ein vollständig durchmisches Volumen behandelt werden kann. Auch für ganze Gebäude, welche ein Luftumwälzsystem haben, kann diese Methode angewandt werden. Bei Luftwechsellmessungen in größeren Wohnhäusern muß darauf geachtet werden, daß eine gute Durchmischung im gesamten Haus vorliegt (Harrje u. a.). Erfahrungsgemäß lassen sich rechteckige Räume im Wohnhausbereich mit Raumhöhen von 2,5 m mit guter Annäherung als gut durchmischt für Luftwechsellmessungen annehmen (Maldonado u. a.). Bei größeren Raumhöhen können thermische Schichtungen von größerem Einfluß sein.

Eine Zone (zone, cell) ist definiert als ein Volumen, in welchem annäherungsweise die Luft als vollständig oder gut durchmischt angenommen werden kann, d. h. daß die thermischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung der Luft in diesem Volumen nahezu konstant sind. In der Praxis läßt sich dieses aus gemachten Erfahrungen abschätzen oder durch gleichzeitige Messungen an verschiedenen Stellen überprüfen. So werden Schwankungen in natürlich belüfteten Wohnräumen, wo die natürliche Luftbewegung aufgrund der zahlreichen Zu- und Abströmöffnungen für eine gute Durchmischung sorgt, sehr klein sein. Im Vorgriff auf den Teil 2 ergibt die Messung des Luftaustauschwirkungsgrades (air exchange efficiency) ein Maß für den Grad der Durchmischung.

Mehrere Räume auf einer Etage können bei geöffneten Türen in guter Näherung zu einer Zone zusammengefaßt werden (Dick, Hitchin u. a.). Sind Türen zwischen Räumen allerdings geschlossen, so können aufgrund des jetzt stark eingeschränkten Luftaustausches beträchtliche Schwankungen in den thermischen und chemischen Eigenschaften der Luft auftreten (Laschober u. a., Bahnfleth u. a., Maldonado u. a.).

Die Spurengase sollten folgenden Anforderungen genügen: sie sollen ungiftig, chemisch inaktiv, zu einem annehmbaren Preis verfügbar sein, keine Adsorption an Oberflächen im Gebäudeinnern zeigen und sie sollen nur bei Konzentrationen in der Umgebungsluft vorkommen, die weit unter denen des Versuchs liegen (Ausnahme CO_2). Außerdem muß die Spurengaskonzentration leicht, schnell und preiswert in der Regel über etwa zwei Dekaden der Konzentrationsskala zu messen sein (Fisk u. a.). Verwendet wurden bislang mehr als 20 verschiedene Gase, von denen die am häufigsten benutzten SF_6 (Schwefelhexafluorid), N_2O (Stickoxydul oder Lachgas) und CO_2 (Kohlendioxyd) sind. Aus toxikologischen Gründen wird Lachgas allerdings zunehmend kritischer bewertet und sollte durch andere Gase ersetzt werden (Olander).

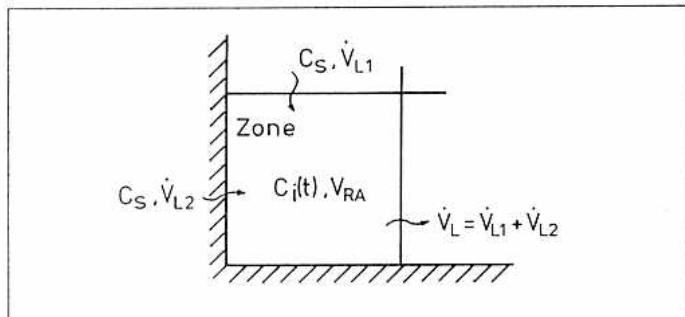


Bild 1 Ein- und austretende Luftströme an einem Raumvolumen

Die Ermittlung der Luftwechselrate aus der Konzentration/Zeit-Kurve ergibt sich über eine Massenbilanz des Spurengases in der Zone, Bild 1:

$$V_{RA} \frac{dc_i}{dt} = \dot{V}_L \cdot c_s - \dot{V}_L \cdot c_i(t) \quad (3)$$

V_{RA} = Raumvolumen

$\dot{V}_L$ = von Nebenräumen und von außen eintretender Gesamtluftvolumenstrom [Volumen/Zeit]

c_i = Spurengaskonzentration im Raum [Masse/Volumen]

c_s = Spurengaskonzentration der Zuluft (supply air)

Hier wurde vereinfachend angenommen, daß der ein- und austretende Luftvolumenstrom gleich und zeitlich konstant ist, und daß die Zuluft, ob von außen oder von einer anderen Zone, die gleiche Zusammensetzung c_s hat. Bei natürlich belüfteten Räumen trifft diese Annahme nur bedingt zu, da z. B. bei einer Meßdauer von 2 h schon Temperaturschwankungen zwischen innen und außen, aber insbesondere Winddruckschwankungen auftreten können. So kann z. B. der Luftwechsel während eines Tages um mehr als den Faktor 3 variieren (Harrje u. a.).

Die Auflösung der Differentialgleichung (3) ergibt

$$c_i(t) = c_s + (c_i^0 - c_s) e^{-\frac{\dot{V}_L}{V_{RA}} \cdot t} = c_s + (c_i^0 - c_s) e^{-n \cdot t} \quad (4)$$

Hier ist n die globale Luftwechselzahl. In der Regel ist der Anteil von Spurengasen in der Zuluft Null.

Dann vereinfacht sich Glg. (4) zu

$$c_i(t) = c_i^0 \cdot e^{-n \cdot t} \quad (5)$$

oder logarithmiert

$$\ln c_i(t) = \ln c_i^0 - n \cdot t \quad (6)$$

wobei $c_i^0 = c_i(t=0)$ ist.

Werden nach der Messung die Konzentrationsmeßwerte logarithmisch und die Zeit linear in einem Koordinatensystem aufgetragen, so ist Glg. (6) eine Geradengleichung mit der Steigung $-n$. Praktisch bedeutet das, daß man lediglich den rechten Anteil der Abfallkurve, welcher annäherungsweise eine Gerade darstellt, benutzt. Die Steigung dieser Geraden entspricht dann dem mittleren Luftwechsel während des Meßzeitraumes. Allerdings ist eine gute Annäherung der Datenpunkte an eine gerade Linie keine Garantie dafür, daß die gemachten Voraussetzungen (z. B. vollständige Durchmischung) erfüllt waren. Hierauf macht D'Ottavio u. a. aufmerksam.

Bild 2 zeigt den Konzentrationsabfall in einem natürlich belüfteten Keller mit einem Raumvolumen $V_{RA} = 75 \text{ m}^3$ und einer

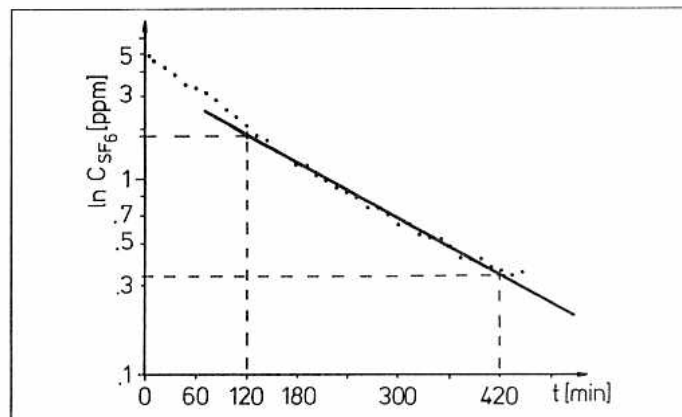


Bild 2 Abfall der Spurengaskonzentration (SF_6) in einem Kellerraum (nach Maldonado u. a.)

Deckenhöhe von $h = 2,3$ m. (nach Maldonado u. a.). Fluktuation bei den ersten Konzentrationsmeßwerten ist meistens vorhanden, da aufgrund der maschinellen Verwirbelung noch künstliche Luftströmungen vorhanden sind. Diese Schwankungen verlieren sich nach ca. 2 min (Sandberg u. a., 1983). Nach einem ersten nicht-exponentiellen Abfall der Konzentration schließt sich ein exponentieller Abfall bis $\tau \rightarrow \infty$ an. Aus Bild 2 berechnet sich die mittlere globale Luftwechselzahl n zu

$$n = \frac{c(t_1) - c(t_2)}{t_2 - t_1} = \frac{1.9 - 0.31}{420 - 120} = 0,0053 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n = 0,3 \frac{1}{h}$$

In der Praxis wendet man in der Regel eine Regressionsrechnung zur Bestimmung von n an.

Der in diesem Beispiel errechnete Luftwechsel der Zone besteht nur für die während des Versuchs herrschenden Randbedingungen (Wetter, Raumtemperaturen auch von Nachbarräumen). Um zu Durchschnittswerten über längere Zeiträume zu kommen, kann der Versuch bei anderen Außenbedingungen wiederholt werden, oder es wird automatisch nach jeder Meßreihe ein neuer Versuch durchgeführt, bei welchem wieder neues Spurengas eingespritzt, verwirbelt und anschließend der Konzentrationsabfall gemessen wird. Ein Nachteil dieser Methode ist der hohe technische Aufwand und das lästige Vorhandensein der Geräteanlage (Analysegerät, Computer, Ventilatoren, Kabel, Schläuche) im Gebäude.

Eine andere Methode, um zu allgemeineren Aussagen für Tages-, Wochen- oder Monatsmittelwerten zu gelangen, ist die Zuhilfenahme von Computer-Simulationsprogrammen, welche die Dichtigkeit eines Gebäudes beschreiben und bei vorgegebenen Wetterbedingungen den Luftwechsel für konkrete Situationen oder über längere Zeiträume errechnen. Die meisten Arbeiten hierzu kommen aus den USA und Kanada (Liddament u. a., 1983; LBL-Modell, Sherman u. a., 1980; NBS-Modell, Walton; NRC-Modell, Sander). Die Ergebnisse sind noch mit großen Ungenauigkeiten behaftet und es sind intensive Forschungsarbeiten im Gang, um diese sogenannten Infiltrationsprogramme zu verbessern (IEA-Annex XX, COMIS).

2.2.2 Spurengasmessung bei konstanter Emissionsrate

Eine einfache und kostengünstige Spurengasmeßmethode zur Bestimmung einer durchschnittlichen Luftwechselzahl über längere Zeiträume (bis zu einigen Monaten), wobei eine zeitlich konstante Menge an Spurengas dem Raum zugeführt wird (constant injection rate technique), wurde 1982 vom Brookhaven National Laboratory von Dietz u. a. 1982, 1984 vorgestellt. Hier gibt eine kleine Patrone (passive constant injection source) (32 mm lang, 7 mm Durchmesser) kontinuierlich einen etwa konstanten Massenstrom eines fluorierten Kohlenwasserstoffs (perfluorocarbon tracer, PFT) an die Zone ab. Die auftretenden Spurengaskonzentrationen liegen im parts per billion Bereich (10^{-9}).

Andere Patronen (passive diffusion tube samplers), welche zwei bis drei Meter entfernt in der gleichen Zone angebracht sind, nehmen wiederum die emittierten Gase auf und werden nach Ablauf des Versuchs im Labor analysiert. Dort wird die aufgenommene Menge an Spurengas ermittelt. Auf diese Weise läßt sich ein Langzeitdurchschnittsluftwechsel bestimmen. Bei der Spurengasmeßmethode mit konstanter Injektionsrate lassen sich keine Aussagen über den Lüftungswirkungsgrad (ventilation efficiency) und das Alter der Luft (age of the air) machen, da die Auswertung der Versuchsdaten auf der Annahme beruht, daß eine Zone vollständig durchmischt ist und Lüftungswirkungsgrade ja gerade ein Maß für die ungleichmäßige Durchmischung der Raumluft sind.

Diese Meßmethode wird kritisch und sollte vermieden werden wenn die Luftwechselraten stark schwanken.

2.2.3 Luftwechselmessung durch Überdruck/Unterdruck im Gebäude

Eine weitere Möglichkeit zur Luftwechselmessung ist, das Gebäude mittels Ventilatoren unter Druck zu setzen. Im Gebäudewind meist ein statischer Überdruck (DC Pressurization) von 50 Pa erzeugt. Der eingeblasene Luftvolumenstrom wird gemessen. Der über das Raumvolumen V_{RA} bestimmbare Luftwechsel wird üblicherweise als n_{50} -Wert bezeichnet. Auf die gleiche Weise wird auch die statische Unterdruckerzeugung im Gebäude praktiziert.

Die technische Durchführung geschieht häufig mit einer „Blower Door“. Sie besteht aus einer Außentüre, in welche ein Ventilator eingebaut ist. Zur Messung wird die eigentliche Außentüre des Gebäudes durch die Blower Door ersetzt. Mit dieser Methode lassen sich schnell verdeckte und ungewollte Leckagen aufspüren. Die Meßmethode ist für kleine Gebäude recht preisgünstig, die Geräte sind auf dem freien Markt erhältlich, und die Meßzeit ist sehr kurz. Für größere Gebäude fallen wegen der größeren Ventilatorleistung höhere Kosten an.

Die Überdruckmethode wird bei Wohnhäusern und auch bei größeren Gebäuden angewendet. Sie erlaubt eine Charakterisierung und eine Vergleichbarkeit von Gebäuden ohne den Einfluß von Klima und Umgebung. Es kann die Durchlässigkeit der Gebäudehülle als Eingabegröße für Computer-Infiltrationsprogramme ermittelt werden. Ebenso kann überprüft werden, ob das Gebäude einem per Gesetz vorgegebenen Dichtigkeitsstandard entspricht, wie es schon in Norwegen und Schweden der Fall ist (Norwegian Building Regulations NS8200; Swedish Building Code SBN 1980, SS 0215 51).

Die Methode ist zur Luftwechselmessung nicht so geeignet wie Spurengasmessungen, da eine Korrelation zwischen der Gebäudedichtheit und der Luftwechselrate hergestellt werden muß, welche in den meisten Fällen nicht klar zu definieren ist. Windeinflüsse, Temperaturdifferenzen und Abschirmungsparameter (z. B. hohe Gebäude in der Nähe oder Hügel etc.) gehen nicht ein. Es läßt sich lediglich ein Daumenwert für den Luftwechsel über Glg. (7) angeben (Liddament, 1986).

$$\bar{n} = \frac{n_{50}}{20} \quad (7)$$

Ein Nachteil der statischen Über- bzw. Unterdruckmethode ist daß Leckagedaten bei Druckdifferenzen gemessen werden, die im Vergleich mit den natürlichen Druckdifferenzen (Wind, Auftrieb) sehr groß sind. Die Ergebnisse müssen deshalb nicht unbedingt repräsentativ sein, da durch die künstlich erzeugten großen Druckdifferenzen sich die Öffnungen von Leckagestellen vergrößern können. Um diesen Nachteil zu beheben, wurde die pulsierende Druckmethode (alternating method, infra-sonic method or AC-pressurization) entwickelt (Graham; Card u. a.; Sherman u. a., 1979; Grimsrud u. a.). Hierbei vergrößert und verkleinert ein großer Kolben bei Frequenzen zwischen 0,1 und 10 Hz das effektive Volumen des Gebäudes. Der Druckverlauf wird gemessen und hieraus das Leckageverhalten des Gebäudes bei niedrigem Druck bestimmt.

2.2.4 Messung des Luftaustauschs zwischen zwei Zonen gemessen mit einem Spurengas

Um den Lufttransport zwischen Wohn- oder Büroräumen korrekt zu beschreiben, läßt sich ebenfalls die Spurengas-Abklingmethode mit nur einem Spurengas benutzen. Diese Methode wurde entwickelt und erfolgreich angewendet, um den Transport des aus dem Erdreich austretenden radioaktiven Gases Radon in den Kriechkeller (crawl space) und in Wohnräume zu bestimmen (Harrie

u. a.; Hernandez u. a.). Genauso läßt sich z. B. der Feuchtetransport von einem in den anderen Raum bestimmen. Der Versuch wird folgendermaßen durchgeführt: Das Spurengas wird in Zone 1 eingespritzt und verwirbelt. Dann werden die Konzentrationen in beiden Zonen über den Meßzeitraum aufgenommen. In Zone 1 fällt gemäß Bild 3 die Konzentration schnell ab und läuft dann exponentiell aus. In Zone 2, wo kein Spurengas injiziert wurde, steigt dann die Konzentration auf Grund des Luftaustauschs zwischen den Zonen zuerst an und fällt dann ebenfalls exponentiell ab. Über Massenerhaltungsgleichungen für beide Zonen läßt sich der Luftwechsel zwischen den Zonen bestimmen. Bild 3 zeigt zwei recht gut gekoppelte Räume, bei denen der Luftaustausch untereinander recht groß ist.

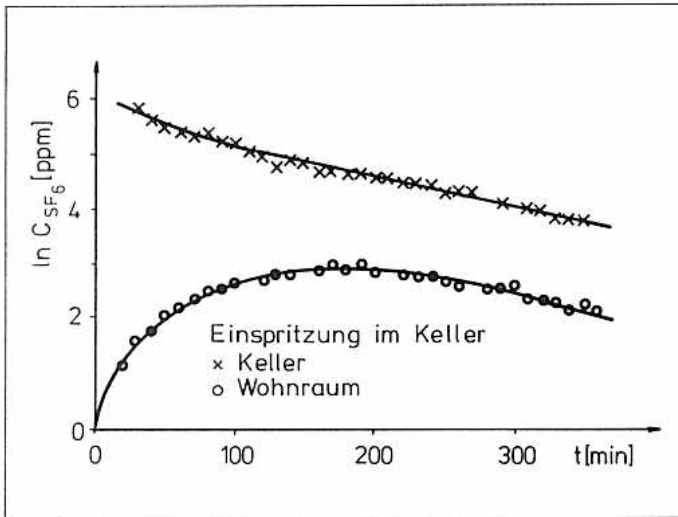


Bild 3 Spurengaskonzentrationsverlauf eines Spurengases im Keller und im Wohnraum eines Hauses, 2-Zonen-Messung (nach Harrje u. a.)

Die Auswertung der Konzentrationskurven ist jetzt wesentlich komplexer als bei der Einzellenbetrachtung. Sinden entwickelte eine iterative Methode und später Hernandez eine einfachere analytische Methode zur Bestimmung des Luftaustauschs. Ford wandte das gleiche Verfahren auf den Luftaustausch zwischen Wohnraum und Speicher an. Diese beiden Zonen waren schlecht gekoppelt, d. h. der Luftaustausch zwischen den Zonen war gering. Außerdem war sowohl der Luftaustausch des Wohnraumes als auch der des Speichers mit der Außenumgebung groß, so daß die gemessenen Konzentrationen auf dem Speicher sehr gering und nur schwer meßbar waren. Die Konzentrationsmessung brachte noch weitere Schwierigkeiten, so daß andere Verfahren geeigneter erscheinen.

2.2.5 Luftaustauschmessungen zwischen mehreren Zonen mit einem Spurengas

Eine z. Zt. von Harrje u. a. favorisierte Spurengasmeßtechnik ist die mit konstanter Konzentration (tracer gas constant concentration method). Sie wird häufig angewendet, um festzustellen, ob alle Zonen eines Gebäudes adäquat belüftet werden. Hierzu wird in jede Zone die gleiche Spurengassorte eingebracht. Der Massenstrom wird dann in jeder Zone so dosiert, daß überall die gleichen Konzentrationen herrschen. Diese Technik erfordert das ständige Messen und Nachregeln der jeweiligen Konzentration in jeder Zone, was gerätetechnisch häufig über ein Analysegerät mit Meßstellenumschalter (multiplexer) bewerkstelligt wird. Für jede Zone des Gebäudes ergibt sich nach Bild 4 eine Massenbilanzgleichung

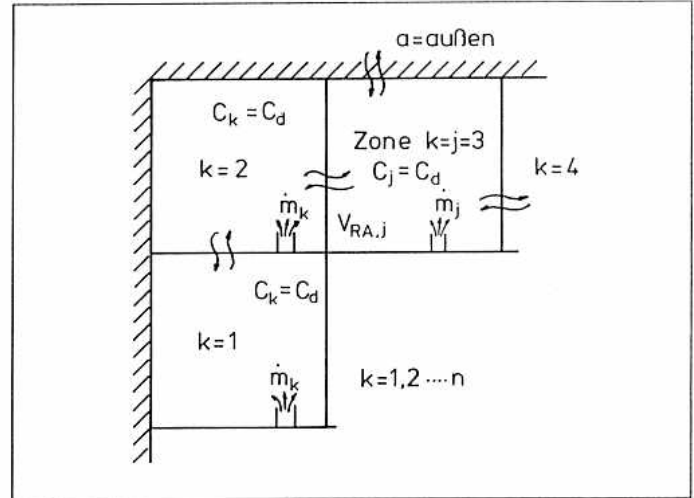


Bild 4 Luftströmung zwischen einzelnen Zonen

$$V_{RA,j} \cdot \frac{d c_j}{dt} = \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{k,j} \cdot c_k - \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{j,k} \cdot c_j + \dot{V}_{a,j} \cdot c_a - \dot{V}_{j,a} \cdot c_j + \dot{m}_j \quad (8)$$

$V_{RA,j}$ = Raumvolumen von Zone j
 c_j = Spurengaskonzentration von Zone j
 $\dot{V}_{k,j}$ = Luftvolumenstrom von Zone k nach Zone j
 $\dot{m}_j$ = Zugeführter Massenstrom an Spurengas in Zone j

Index a = außen

Im stationären Fall gibt es keine Konzentrationsänderung in den Zonen. Außerdem sind alle Konzentrationen in den Zonen gleich und die Spurengaskonzentration in der Außenluft häufig Null. Dann vereinfacht sich Glg. (8) zu

$$0 = \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{k,j} \cdot c_d - \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{j,k} \cdot c_d - \dot{V}_{j,a} \cdot c_d + \dot{m}_j \quad (9)$$

$$\dot{V}_{j,a} + \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{j,k} - \sum_{k=1, k \neq j}^n \dot{V}_{k,j} = \frac{\dot{m}_j}{c_d} \quad (10)$$

c_d = gewünschter (desired) konst. Konzentrationswert, welcher in allen Zonen gleich eingestellt wird.

Eine Luftmassenbilanz am Raumvolumen j führt unter der Annahme, daß die Dichten der ein- und austretenden Luftvolumenströme gleich sind, zu Glg. (11)

$$\dot{V}_{a,j} = \frac{\dot{m}_j}{c_d} \quad (11)$$

Bei Kenntnis von c_d und dem eingespritzten Spurengasmassenstrom läßt sich somit leicht die Infiltration in die Zone j bestimmen.

2.2.6 Messung des Luftaustauschs zwischen mehreren Zonen mit mehreren Spurengasen

Das einfachste System hierzu ist die Erweiterung der schon vorher besprochenen Spurengasmeßmethode mit konst. Injektionsrate mit einer passiven Injektionsquelle (passive injection source) und

einer passiven Spurengasadsorptionspatrone (passive sampler). Injektionspatronen, welche jetzt verschiedene Fluorkohlenwasserstoffe ausstoßen und Adsorptionspatronen, welche die unterschiedlichen Gase aufnehmen, werden in den Zonen verteilt. Nach Beendigung der Messung werden die Patronen auf ihre Menge an adsorbierten Gasen im Labor untersucht. Anschließend werden die mittleren Luftaustauschströme bestimmt (Dietz u. a., 1984).

Andere Spurengasmeßmethoden mit konstanter Injektionsrate mit z. B. aktiven Injektionsquellen und Probennehmern haben wiederum den Nachteil, daß ein sehr großer Geräteaufwand getrieben werden muß; wegen der langen Meßdauer müssen die Geräte ständig überprüft und zum anderen eine riesige Datenmenge ausgewertet werden.

Zusammenfassung

Die Unzulänglichkeit der Kenngröße „Luftwechselzahl“ zur Risikoabschätzung durch Luftschadstoffe wird erläutert. Ihre Berechtigung hat die Luftwechselzahl bei vollständig durchmischten Zonen, wobei ihre Abhängigkeit von Wind- und Temperatureinflüssen zu berücksichtigen ist.

Es wird die verbreitetste Luftwechselmeßmethode mit Spurengasen nach der Abklingmethode zunächst für eine einzelne Zone eines Gebäudes erläutert und an einem Beispiel erklärt. Anschließend wird die Spurengasmessung mit konstanter Emissionsrate mittels kleiner Verdunstungspatronen und Adsorptionspatronen beschrieben. Blower-Door-Messungen werden beschrieben und die Beschreibung der Messung des Luftaustauschs zwischen zwei Zonen mit einem Spurengas und zwischen beliebigen Zonen mit einem und mehreren Spurengasen folgt.

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des IEA-Annex 18 „Demand Controlled Ventilating Systems“ und wurde von der PBE Jülich im Auftrag des BMFT gefördert. Herrn Brühwiler von der Eidgenössischen Material Prüfanstalt in Dübendorf (CH) danke ich für die Diskussion zur Übersetzung des englischen Fachvokabulars. Insbesondere danke ich Herrn N. Breum vom Danisch Nat. Inst. Occ. Health in Hellerup (DK) für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und für seine wertvollen Hinweise.

Formelzeichen

- c – Konzentration an Spurengas oder Schadstoff [Masse/Volumen]
- h – Höhe
- $\dot{m}$ – Spurengasmassenstrom [Masse/Zeit]
- n – globale Luftwechselzahl [1/Zeit]
- $\bar{n}$ – durchschnittliche globale Luftwechselzahl über einen längeren Zeitraum
- n_{50} – Luftwechselzahl bei einer künstlich aufgebrachten Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Gebäudeinnerem und Umgebung
- t – Zeit
- τ_n – nominale Zeitkonstante
- $\dot{V}_L$ – Luftvolumenstrom [Volumen/Zeit]
- V_{RA} – Raumvolumen

Indizes (unten)

- a – außen
- e – im Abluftkanal gemessen (exhaust duct)
- d – gewünschte (desired) Konzentration, Kap. 2.2.5
- i – innen
- j, k – Laufvariable
- s – im Zuluftkanal gemessen (supply duct)

Indizes (oben)

- o – zur Zeit t = 0

Literatur:

- Bahnfleht, D. R.; Moseley, T. D.; Harris, W. S.: Measurement of Infiltration in Two Residences, ASHRAE Transactions 1957, Vol. 63, p. 439–441
- Card, W. H.; Sallmann, A.; Graham, R. W.; Drucker, E. E.: Air Leakage Measurement of Buildings by an Infrasonic Method, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Syracuse University, Techn. Rep., 77-15
- Dick, J. B.: Measurement of Ventilation Using Tracer-gas Technique Heating, Piping and Air Conditioning, 1950, Vol. 22, p. 131–137
- Dietz, R. N.; Cote, E. A.: 1982. Air Infiltration Measurements in a Home Using a Convenient Perfluorocarbon Tracer Technique, Environment International, Vol. 8, p. 419–433
- Dietz, R. N.; Goodrich, R. W. u. a.: 1984: Detailed Description and Performance of a Passive Perfluorocarbon Tracer System for Building Ventilation and Air-Exchange Measurements, Vortrag auf „Symposium Measured Air Leakage Performance of Buildings“, American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, 2.–3. April 1984
- D'Ottavio, T. W.; Dietz, R. N.: 1985. Errors resulting from the use of single zone ventilation models on multi-zone buildings, ASHRAE Trans. (2B): 1777–1788
- Fisk, W. J.; Binenboym, J.; Kabioli, H. u. a.: A Multi-Tracer System for Measuring Ventilation Rates and Ventilation Efficiencies in Large Mechanically-Ventilated Buildings, Suppl. to Proc. of 6th AIC Conference, 16.–19. Sept. 1985, Netherlands
- Ford, J. K.: 1982. Heat Flow and Moisture Dynamics in a Residential Attic, Princeton University Center for Energy and Environmental Studies Rept. No. 148.
- Graham, R. W.: 1977. Infrasonic Impedance Measurement of Buildings – Air Leakage Determination, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Syracuse University, Techn. Rep. TR-77-15
- Grimsrud, D. T.; Sherman, M. H.; Sonderegger, R. C.: 1980. Air Leakage in a Building at Low Pressures Using an Alternating Pressure Source, Proc. XXI Int. Congress for Building Services Engineering, 17.–19. April 1980
- Harrje, D. T.; Dutt, G. S.; Bohac, D. L.; Gadsby, K. L.: Documenting Air Movements and Infiltration in Multicell Buildings Using Various Tracer-Gas Techniques, Preprint, ASHRAE Transactions 1985, Vol. 91, Pt2, HI-85-40 No. 3
- Hitchin, E. R.; Wilson, C. B.: A Review of Experimental Techniques for the Investigation of Natural Ventilation in Buildings, Building Science 1967, Vol. 2, p. 59–82
- Hernandez, T. L.; Ring, J. W.: 1982. Indoor Radon Source Fluxes, Experimental Test of a Two-Chamber Model, Environment International Special Issue on Indoor Air Pollution, Vol. 8, pp. 45–57
- Laschober, R. R.; Healy, J. H.: Air leakage in split-level residences, ASHRAE trans, vol 70, P 364–374.
- Liddament, M. W.; Allen, C.: 1983. The Validation and Comparison of Mathematical Models of Air Infiltration, AIVC Technical Note No. 1
- Liddament, M. W.: 1986. Air Infiltration Calculation Techniques – An Application Guide, Air Infiltration and Ventilation Centre, Berkshire (UK)
- Liddament, M. W.: July 1987. Technical Note 21, A Review and Bibliography of Ventilation Effectiveness, Air Infiltration and Ventilation Centre, Berkshire (UK)
- Maldonado, E. A. B.; Woods, J. E.: 1983. Ventilation Efficiency as a Measure of Characterizing Air Distribution in a Building for Indoor Air Quality Evaluation. ASHRAE Transactions 1983, Vol. 89, pt. 2A+B
- N. N.: – COMIS – Conjunction of Multizone Infiltration Specialists, Forschungsprojekt des U.S. Department of Energy, No. DE-ACC 76SF00098, Lawrence Berkeley Laboratory, Buildings Science Division, Berkeley, CA 94720, USA
- N. N.: IEA-Annex XX, Forschungsvorhaben der Internationalen Energieagentur (IEA) – Air Flow Patterns, Dez. 1987
- N. N.: Technical Note 22, A Subject Analysis of the AIVC's Bibliography Database, 5th Edition, Oct. 1987, Air Infiltration and Ventilation Centre, Berkshire (UK)
- Olander, L.: Luftomsättningsmätning – en jämförelse mellan olika instrument och gasser. Arbete och Hälsa 1983:3 (in schwedisch)
- Sandberg, M.; Sjöberg, M.: The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Building and Environment, Vol. 18, No. 3, p. 181–197, 1983
- Sander, D. M.: Fortran IV Program to Calculate Air Infiltration in Building National Research Council, Division of Building Research, Canadian Computer Program No. 37, Ottawa, 1974
- Sherman, M. H.; Grimsrud, D. T.; Sonderegger, R. C.: 1979. Low Pressure Leakage Function of a Building. Proc. ASHRAE/DOE, Conf. „Thermal performance of the Exterior Envelopes of Buildings“, Dec. 3–5, 1979 Florida
- Sherman, M. T. and Grimsrud, D. T.: 1980. Measurement of Infiltration Using Fan Pressurization and Weather Data. AIC Conference „Instrumentation and Measuring Techniques“, Windsor (UK)
- Sinden, F. W.: 1978. „Multi-chamber Theory of Air Infiltration“, Building and Environment, Vol. 13, p. 21–28
- Walton, G. N.: A Computer Program for Estimating Infiltration and Indoor Room Air Flows. NBS Report NBSIR 83-2635, November 1982.

Willigert Raatschen

Was ist Lüftungseffektivität?

2. Teil*

Im Teil 1 dieser Reihe wurden die häufigsten bislang entwickelten Methoden zur Bestimmung des Luftaustauschs von Räumen/Gebäuden vorgestellt. Der 2. Teil gibt eine Einführung in das Kapitel Lüftungseffektivität. Es wird das Konzept vom Alter der Luft und der Begriff Luftaustauschwirkungsgrad (air exchange efficiency) erläutert. Am Beispiel der Spurengasmessungstechnik nach der Abklingmethode wird dieser Begriff anschaulich erklärt und anhand der Auswertung eines Meßprotokolls vertieft.

Der dritte und letzte Teil erweitert diese Thematik auf die Spurengasmessung bei konstantem Volumenstrom und auf die Spurengasmessung nach der Puls-Methode. Weiterhin wird die Abfuhr von Schadstoffen aus dem Raum behandelt und die Kenngröße „Schadstoffabfuhrwirkungsgrad“ erklärt.

What is ventilation efficiency?

The first of this three part series dealt with the various ways of measuring air exchange rates of rooms, in between rooms, and of whole buildings. The second part here describes the theoretical background to the „age concept“ and terms like „air exchange efficiency“ and „local air exchange indicator“.

These terms are explained for the tracer-gas decay method.

The most important references to this subject are reviewed. The theory presented is underlined by examples.

The third part describes the above stated terms for the tracergas technique with constant concentration and the pulse method. Definitions for contaminant removal efficiency are explained at the end.

Efficacité de la ventilation, c'est quoi?

La présente série d'articles comprend trois parties, qui résument surtout des publications de source étrangère, ayant pour objet le renouvellement d'air, le coefficient d'utilisation de la ventilation, ainsi que le coefficient d'efficacité de la ventilation. Sans que cette étude soit exhaustive, la première partie porte sur les différentes méthodes de mesure du renouvellement d'air par le biais de gaz traceurs pour bâtiments à une seule cellule, respectivement pour bâtiments à plusieurs cellules interconnectées. Dans la mesure où cela était possible, les méthodes sont démontrées moyennant des exemples.

La deuxième partie porte sur les bases théoriques, permettant de mieux comprendre des notions telles que „l'âge de l'air“ et „le coefficient d'efficacité du renouvellement d'air“, qui elles caractérisent la circulation de l'air dans l'espace et la qualité du renouvellement d'air. L'exemple de la méthode de dissipation du gaz traceur permet de définir ces notions, ce qui est encore approfondi à l'aide de procès-verbaux d'essais.

La troisième partie traite de la méthode de mesure, permettant de déterminer la concentration constante du gaz traceur, ainsi que de la méthode basée sur l'étude des effets d'un gaz traceur injecté dans la ventilation, les deux méthodes étant validées par des exemples respectifs. La dernière partie porte sur l'évacuation d'éléments polluants de l'espace et sur les définitions qui s'emploient couramment dans ce contexte, telles que „coefficient d'efficacité de la ventilation“ et „coefficient d'efficacité de l'évacuation d'éléments polluants“.

3. Lüftungseffektivität

Bis jetzt wurden die wesentlichen Methoden zur Bestimmung der globalen Luftwechselzahl – sei es als Momentan- oder Durchschnittswert – diskutiert. Diese Art von Messungen bezog sich auf eine oder mehrere Zonen, wobei eine Zone bei natürlich belüfteten Gebäuden einen Raum, häufig mehrere Räume und sogar ganze Etagen beinhalten kann.

Eine andere Fragestellung ergibt sich bei maschinell belüfteten Gebäuden. Hier läßt sich die globale Luftwechselzahl häufig aus den bekannten Zu- oder/und Abluftvolumenströmen bestimmen. Werden zudem In- oder Exfiltrationsströme über Fugen und Ritze vermutet, so lassen sich diese ebenfalls über die vorher erläuterten Methoden (bei abgeschalteter Lüftungsanlage) abschätzen oder über eine Volumenstrommessung im Zu- und Abluftkanal bestimmen.

Ein anderer wichtiger Aspekt bei maschinell belüfteten Räumen ist aber die Effektivität oder die Wirksamkeit des Lüftungssystems, d. h., wie effizient wird die Luft in der Aufenthaltszone ausgetauscht oder Schadstoffe abgeführt. Beide Anforderungen müssen aber nicht unbedingt die gleiche Lüftungsstrategie erfordern (Skaret u. a. 1981) da die Luftströmung gänzlich verschieden von der Schadstoffströmung sein kann.

Hiermit wird deutlich, daß es nicht nur eine Bewertungszahl zur Charakterisierung eines Lüftungssystems geben kann, die alles beschreibt.

3.1 Luftbewegung und Durchmischung

Lüftungswirksamkeit bezieht sich auf die Art und Weise, in welcher sich Außenluft und Raumluft in einer definierten Zone vermischen. Die Luftbewegung im Raum wird durch das Zusammenwirken vom Impuls der eintretenden Luft und den konvektiven Strömen erzeugt, welche im Erwärmen oder Kühlen von Oberflächen, Wärmeerzeugern und Bewohnern begründet ist.

Man unterscheidet drei Sonderfälle von Strömungsarten: die Verdrängungsströmung als beste Strömungsform, die vollständige Durchmischung und die Kurzschlußströmung.

In der Praxis tritt eine Kombination dieser drei Mischungsarten auf, welche außerdem noch durch die Art der Tätigkeit der Personen im Raum beeinflusst wird.

3.2 Aufenthaltszone

In einigen Fällen bezieht sich die Lüftungswirksamkeit auf bestimmte Stellen innerhalb eines Raumes oder Gebäudes oder auf die Aufenthaltszone, während sie sich in anderen Fällen auf den gesamten Raum beziehen kann. Im Haus oder Büro fällt die Aufenthaltszone meistens mit dem beheizten oder klimatisierten Platz zusammen. In Industriebauwerken wird es der Arbeitsplatz

* Manuskript eingereicht im April 1988

Der 1. Teil dieses Beitrags ist in der 11-Mai-Ausgabe 1988 erschienen.

sein, welcher sich deshalb auf einen relativ kleinen Abschnitt des gesamten Gebäudes beschränken kann.

3.3 Das Konzept vom Alter der Luft und der Luftaustauschwirkungsgrad

Bild 5 zeigt die Strompfade von Luftmolekülen durch einen Raum von der Zu- bis zur Abluftöffnung, welche alle durch einen festen, aber beliebig gewählten Punkt P im Raum gehen. Ein bei ① in den Raum eintretendes Luftmolekül kann jetzt auf unterschiedlichen Wegen den Beobachtungspunkt P erreichen und braucht hierzu unterschiedlich viel Zeit. Die unendliche Vielzahl von möglichen Wegen zum Punkt P, liegt in der Zufälligkeit der Turbulenz der Raumluft begründet, welche sich nicht vorher bestimmen läßt. Um nicht einzelne Moleküle betrachten zu müssen, bedient man sich der Statistik und errechnet eine Durchschnittszeit. Bei Erreichen von Punkt P haben die Luftmoleküle gerechnet vom Eintrittsort ① ein gewisses Alter τ_p (age of the air) erreicht. Die durchschnittliche Zeitspanne, welche die Moleküle im Punkt P brauchen, um von dort zur Abluftöffnung ② zu gelangen, wollen wir mit „verbleibender Verweilzeit“ (residual residence time, residual life time or life expectancy) $\tau_{r,p}$ bezeichnen. Betrachten wir nun die Zeitspanne, welche von ① nach ② durch den Punkt P im Durchschnitt für alle Moleküle verstreicht, dann ist das die „gesamte Verweilzeit“ $\tau_{r,p}$ (total residence time, oder nur residence time) und wird im folgenden nur mit „Verweilzeit“ bezeichnet. Die Verweilzeit $\tau_{r,p}$ ist nun abhängig von der Lage des Punktes im Raum und von dem Strömungsmuster der Luft im Raum.

Die nominale Zeitkonstante τ_n als Kehrwert der globalen Luftwechselzahl n^1

$$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} = \frac{1}{n} \quad (12)$$

$\dot{V}_L$ = Luftvolumenstrom
 V_{RA} = Raumvolumen

ist eine reale und meßbare Größe in jedem Lüftungssystem. Sie ist unabhängig vom Lüftungssystem und vom Strömungsmuster der Luft. Betrachtet man jedoch die durchschnittliche Verweilzeit $\tau_{r,v}$ von allen Molekülen im Raum, so stellt die nominale Zeitkonstante τ_n die kürzest mögliche *durchschnittliche* Verweilzeit dar. Wie vorher schon besprochen, stellt die Verdrängungslüftung die effektivste aller Lüftungsarten für den Austausch von Luft dar; hier ist die durchschnittliche Verweilzeit $\tau_{r,v}$ am kürzesten.

$$\tau_{r,v} = \tau_n \text{ für Verdrängungsströmung} \quad (13)$$

Bei vollständiger Durchmischung der eintretenden Luft ist die durchschnittliche Verweilzeit $\tau_{r,v}$ für die Raumluft doppelt so groß wie die nominale Zeitkonstante

$$\tau_{r,v} = 2 \cdot \tau_n \text{ bei vollständiger Durchmischung} \quad (14)$$

Sandberg u. a., 1983 weist die Bezeichnung statistisch nach. Sie läßt sich auch durch Messungen exakt bestätigen.

Bei Kurzschlußströmung erhöht sich die durchschnittliche Verweilzeit, so daß sie ein Vielfaches der nominalen Zeitkonstanten τ_n betragen kann.

Da für den Austausch der Raumluft der Idealfall die Verdrängungslüftung ist und für diesen Fall $\tau_{r,v} = \tau_n$ ist, definiert man das Verhältnis aus nominaler Zeitkonstante τ_n und Verweilzeit $\tau_{r,v}$ als Luftaustauschwirkungsgrad η_a (air exchange efficiency) (Skåret, 1986)²

¹ In Skandinavien wird z. Z. versucht, den alten unzutreffenden Begriff „Luftaustauschzahl“ (air exchange rate) zu vermeiden. Er soll durch „specific flow rate“ ersetzt werden und die Einheit $[\frac{m^3/h}{m^3}]$ haben.

² Die Definitionen in Glg. (15, 16 und 17) wurden von einem Arbeitskreis der »Nordischen Lüftungsgruppe«, an welchem alle skandinavischen Länder beteiligt sind, unter dem Vorsitz von Mats Sandberg entwickelt und von Eimund Skåret publiziert.

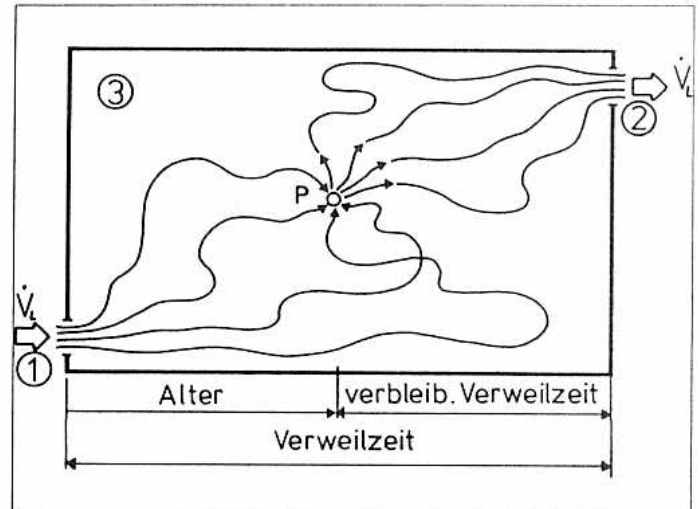


Bild 5: Strompfade von Luftmolekülen in einem Raum zum Punkt P (nach Sandberg 1984b)

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_{r,v}} \quad (15)$$

Für $\eta_a = 1$ unidirektionale Strömung, ideale Kolbenströmung
 $0,5 < \eta_a \leq 1$ Verdrängungslüftung
 $\eta_a = 0,5$ vollständige Durchmischung
 $0 < \eta_a < 0,5$ Kurzschlußströmung

Es sei noch angemerkt, daß das Durchschnittsalter der Raumluft τ_v immer halb so groß wie die durchschnittliche Verweilzeit $\tau_{r,v}$ ist. (Skåret u. a., 1985).

$$\tau_v = 0,5 \tau_{r,v} \quad (16a)$$

Hiermit ergibt sich für den Luftaustauschwirkungsgrad η_a

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2 \cdot \tau_v} \quad (16b)$$

Dieser so definierte Luftaustauschwirkungsgrad sagt etwas über die Qualität des Gesamtluftaustausches im Raum aus. Hieraus lassen sich aber z. B. keine Aussagen über die Aufenthaltszone machen.

In der Aufenthaltszone soll die eintretende Luft schneller als an anderen Stellen im Raum ausgetauscht werden, d. h. ihr Durchschnittsalter soll geringer sein als das Durchschnittsalter τ_v der Luft im ganzen Raum. Das Messen eines lokalen Alters und der Vergleich mit dem Durchschnittsalter τ_v des ganzen Raumes ergibt eine relative Lüftungswirksamkeit (potential) für die betrachtete Zone im Raum.

Das Verhältnis von Durchschnittsalter τ_v und lokalem Alter τ_p bezeichnet Skåret, 1986 auch als lokale Luftaustauschkennzahl ϵ_a (local air exchange indicator).

$$\epsilon_a = \frac{\tau_v}{\tau_p} = \frac{\tau_{r,v}}{2 \tau_p} \quad (17)$$

3.4 Messung des Alters der Luft und des Luftaustauschwirkungsgrades

Zur Messung des Alters der Luft an einem Ort oder vom gesamten Raum bedient man sich unterschiedlicher Spurengasmeßmethoden.

3.4.1 Die Spurengas-Abklingmethode

Die Abklingmethode (decay method, step-down method, dilution method oder washout method) war bis vor einigen Jahren die klassische Art, den Luftwechsel von Zonen zu bestimmen (siehe

Kap. 2.2.1, Ki 5/88). Heute tritt sie aufgrund ihrer begrenzten Aussagefähigkeit immer mehr in den Hintergrund.

Bei der Abklingmethode wird ein Spurengas in den Zuluftkanal des Raumes oder direkt in den Raum gesprüht und mit Lüftern verwirbelt, so daß Konzentrationsunterschiede im Raum vernachlässigbar klein werden. Die Menge des versprühten Spurengases muß nicht gemessen werden. Sie wird vielmehr durch den Meßbereich des Analysegerätes festgelegt. Nach der Verwirbelung zum Zeitpunkt $t=0$ wird der Konzentrationsabfall über der Zeit gemessen.

Messungen des Alters der Luft als Durchschnittswert vom Raum erfordern immer einen Abluftkanal, durch den die gesamte Luft abströmt und in welchem die Abluftkonzentration gemessen werden kann. In einem Raum mit natürlicher Lüftung ist zwar die globale Luftwechselzahl nach der Abklingmethode meßbar, aber nicht das Alter der Raum-Luft oder der Luftaustauschungsgrad. Wohl aber läßt sich das Alter der Luft in einem Punkt P messen (vergl. Kap. 3.4.2).

An das Spurengas müssen neben den schon in Kap. 2.2.1 (Ki 5/88) erwähnten Anforderungen noch weitere gestellt werden:

Die Spurengasmoleküle müssen sich wie Luftmoleküle verhalten (passive or linear tracer gas), d. h. sie sollen die Luftströmung nicht beeinträchtigen oder ein eigenes Strömungsmuster im Raum erzeugen. Ein ideales Spurengas sollte sich nach Sandberg u. a., 1983 also immer passiv und linear verhalten. Linear heißt hier, daß die Antwort des Systems bei Zugabe von Spurengas rein additiv ist und keine Wechselwirkungen zwischen Spurengas- und Luftmolekülen bestehen. Es wird ferner vorausgesetzt, daß keine Diffusion des Spurengases entgegen Stromrichtung im Zuluftkanal stattfindet. Diese Annahme ist bei mechanischen Lüftungssystemen auf Grund der hohen Luftgeschwindigkeiten in den Kanälen erfüllt. Weiterhin soll kein Molekül, wenn es im Raum ist, wieder in den Zuluftkanal eintreten können oder vom Abluftkanal in den Raum zurückströmen. Somit ist die ein- und ausströmende Masse an Spurengas das Produkt aus Volumenstrom und Spurengaskonzentration.

3.4.2 Messung des lokalen Alters

An einer interessierenden Stelle im Raum wird die Konzentration gemessen. Bild 6 zeigt den Spurengaskonzentrationsverlauf über der Zeit.

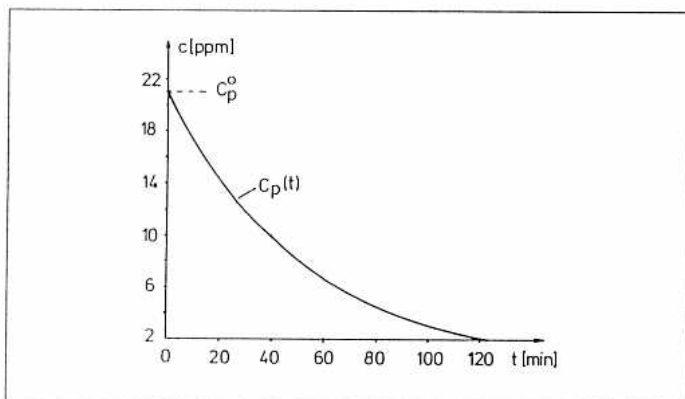


Bild 6: Spurengaskonzentrationsverlauf im Punkt P eines Raumes nach der Abkling-Methode (nach Breum)

Mit dem Alter τ_p der Luft an einem beliebigen Punkt P bezeichnete man die Zeitspanne vom Eintritt eines Luftmoleküls in den Raum bis zur Ankunft im Punkt P.

Der prozentuale Anteil $F(t)$ der Luft im Punkt P mit einem Alter kleiner als t berechnet sich zu

$$F(t) = 1 - \frac{C_p(t)}{C_p^0} \quad (18)$$

wobei C_p die Spurengaskonzentration im Punkt P und C_p^0 die Spurengaskonzentration im Punkt P zur Zeit $t = 0$ ist.

In der Statistik wird $F(t)$ „Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit“ (cumulative distribution function) bezeichnet. Hieraus läßt sich jetzt die Häufigkeitsfunktion $f(t)$ (oder Häufigkeitsdichte oder Wahrscheinlichkeitsdichte; engl. frequency function) ableiten.

$$f(t) = \frac{dF}{dt} \quad \text{oder} \quad \int_0^t f(t) dt = F(t) \quad (19)$$

Während die Verteilfunktion $F(t)$ dimensionslos ist, hat die Häufigkeitsfunktion $f(t)$ die Dimension $\frac{1}{\text{Zeit}}$. Da das Alter nie negativ sein kann, erstreckt sich das interessierende Zeitintervall von null bis unendlich. Der Wertebereich von $F(t)$ geht von null bis eins. Weiterhin definiert die Statistik folgende Anfangsmomente (Bartsch, 1982 oder jedes Lehrbuch der Statistik)

$$\mu^{(0)} = \int_0^\infty c(t) dt \quad \text{0-ter Ordnung}$$

$$\mu^{(1)} = \int_0^\infty t \cdot c(t) dt \quad \text{1-ter Ordnung}$$

$$\mu^{(n)} = \int_0^\infty t^n c(t) dt \quad \text{n-ter Ordnung für } n \geq 0$$

Das durchschnittliche Alter τ_p aller Moleküle im Punkt P oder statistisch ausgedrückt, „der gewogene arithmetische Mittelwert der Zeit“ errechnet sich laut Statistik zu

$$\tau_p = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt \quad (20)$$

Die Auswertung von Glg. (20) erfolgt durch partielle Integration, wobei es bei der Abklingmethode günstig ist, als Integralfunktion von $f(t)$ die Funktion $F(t)-1$ zu wählen.

$$\tau_p = \int_0^\infty (1-F(t)) dt \quad (21)$$

Bei Anwendung der Abklingmethode beträgt nun das Durchschnittsalter τ_p der Moleküle im Punkt P mit Glg. (18)

$$\tau_p = \int_0^\infty (1-F(t)) dt = \int_0^\infty \frac{C_p(t)}{C_p^0} dt = \frac{\mu_p^{(0)}}{C_p^0} \quad (22)$$

Für den Konzentrationsverlauf aus Bild 6 ist in Bild 7 die Verteilungsfunktion $F_p(t)$ und in Bild 8 die Häufigkeitsfunktion $f_p(t)$ aufgetragen. Das Durchschnittsalter τ_p entspricht jetzt nach Glg.

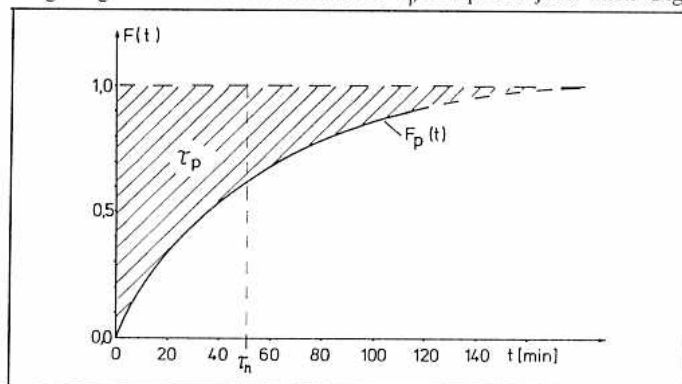


Bild 7: Verteilungsfunktion $F(t)$ für den Konzentrationsverlauf aus Bild 6

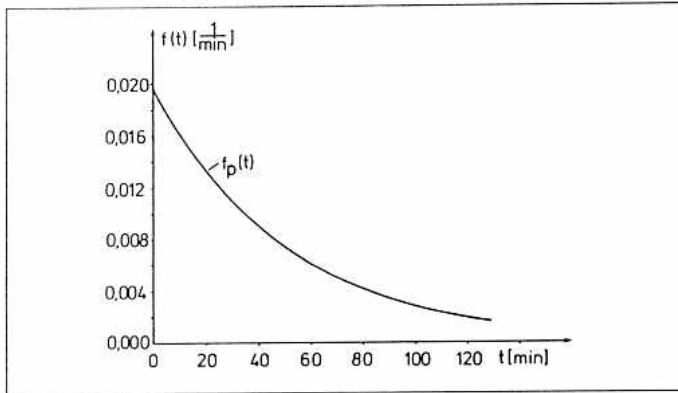


Bild 8: Darstellung der Häufigkeitsfunktion $f(t)$ für den Konzentrationsverlauf aus Bild 6

(22) der Fläche über der Verteilungsfunktion (area above the curve) bis zum Ordinatenwert 1.

3.4.3 Durchschnittliche Verweilzeit der Spurengasmoleküle

Zur Bestimmung des Durchschnittsalters der Raumluft (Kap. 3.4.4) wird die Spurengaskonzentration im Auslaßkanal e gemessen. Die Verteilungsfunktion hier ergibt sich zu

$$F_e(t) = 1 - \frac{C_e(t)}{C_e^0} \quad (23a)$$

Das Durchschnittsalter τ_e der Spurengasmoleküle im Auslaßkanal, hier identisch mit der durchschnittlichen Verweilzeit aller Moleküle ergibt sich analog zu Glg. (21) zu

$$\tau_e = \int_0^{\infty} \frac{C_e(t)}{C_e^0} dt \quad (23b)$$

3.4.4 Messung des Durchschnittsalters der Raumluft

Das Durchschnittsalter τ_v aller Moleküle im Raum, was nicht zu verwechseln ist mit dem Alter der Luft τ_e im Auslaßkanal, ergibt sich analog zu den obigen Ausführungen, nur daß jetzt nicht eine Stelle im Raum, sondern der ganze Raum betrachtet wird. Theoretisch entspricht das Durchschnittsalter der Raumluft τ_v der Mitteilung über alle infinitesimalen Volumenelemente im Raum

$$\tau_v = \frac{1}{V_{RA}} \cdot \int \tau_p dV_{RA} \quad (24)$$

Über Spurengasmessungen ist diese Auswertung aber praktisch nicht möglich.

Ein anderer Weg ergibt sich über die Verteilungsfunktion $F(t)$ im Auslaßkanal: Der prozentuale Anteil von Luftmolekülen im Raum mit einem Alter kleiner als t ist (analog zu Glg. (18))

$$F(t) = 1 - \frac{M(t)}{M^0} \quad (25)$$

wobei M^0 die gesamte Masse an Spurengas im Raum zur Zeit $t=0$ und $M(t)$ diejenige zur Zeit t bezeichnet.

Strömt die Luft über einen Abluftkanal ab, so ergibt eine Massenbilanz

$$M(t) = M^0 - M_{AUS}(t); M_{AUS}(t) = \dot{V}_L \int_0^t C_e(t) dt \quad (26)$$

Die Spurengasmasse M^0 zur Zeit $t=0$ ist

$$M^0 = V_{RA} \cdot C^0 \quad (27)$$

Nach unendlich langer Zeit ist die gesamte eingespritzte Spurengasmenge durch den Abluftkanal abgeströmt, so daß ebenfalls gilt

$$M^0 = \dot{V}_L \cdot \int_0^{\infty} C_e(t) dt \quad (28)$$

Es ergibt sich mit Glg. (25) für die Verteilungsfunktion $F(t)$ und die Häufigkeitsfunktion $f(t)$

$$F(t) = \frac{\int_0^t C_e(t) dt}{\int_0^{\infty} C_e(t) dt} \quad (29)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{C_e(t)}{\int_0^{\infty} C_e(t) dt} \quad (30)$$

$$\tau_v = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C_e(t) dt}{\int_0^{\infty} C_e(t) dt} = \frac{\mu_e^{(1)}}{\mu_e^{(0)}} \quad (31)$$

Durch die alleinige Messung des Spurengaskonzentrationsverlaufes im Auslaßkanal läßt sich jetzt mit Glg. (16 b) und Glg. (31) der Luftaustauschwirkungsgrad bestimmen.

Die Berechnung der nominalen Zeitkonstanten τ_n kann ebenfalls aus dem Konzentrationsverlauf im Abluftkanal leicht über eine Massenbilanz bestimmt werden und ergibt sich zu

$$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} = \frac{\int_0^{\infty} C_e(t) dt}{C_e^0} \quad (31a)$$

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2 \tau_v} = \frac{\left[\int_0^{\infty} C_e(t) dt \right]^2}{2 \cdot C_e^0 \cdot \int_0^{\infty} t \cdot C_e(t) dt} \quad (31b)$$

3.4.5 Versuchsauswertung von Meßwerten nach der Abkling-Meßmethode

Laut Sandberg, 1988 soll die Meßperiode $\tau_{Meß}$ mindestens $\tau_{Meß}^{\min} = 2 \cdot \tau_n$ betragen. Wird die Konzentration nahezu kontinuierlich gemessen, so kann die Auswertung von Glg. (31) numerisch erfolgen. Bei Messungen in bestimmten Zeitabständen läßt sich τ_v auch analytisch bestimmen. Hierzu wird Glg. (31) in Summenschreibweise formuliert.

$$\tau_v = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} C_{e,i} \cdot \tau_i \cdot \Delta \tau}{\sum_{i=1}^{\infty} C_{e,i} \cdot \Delta \tau} \quad (32)$$

Da die Meßperiode nach einer bestimmten Zeit abgebrochen wird, ist eine Extrapolation vom letzten Meßwert bis unendlich durchzuführen. Der rechte Ast der Konzentration-Zeitkurve verläuft exponentiell näherungsweise nach der Gleichung

$$C_e(t) = C^0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot t} \quad (33)$$

Die Integrale von Glg. (31) werden nun aufgespalten in der Form

$$\tau_v = \frac{\int_0^{t'} t \cdot C_e(t) dt + \int_{t'}^{\infty} t \cdot C_e(t) dt}{\int_0^{t'} C_e(t) dt + \int_{t'}^{\infty} C_e(t) dt} \quad (34)$$

Die Lösung der beiden rechten Integrale in Zähler und Nenner von Glg. (34) lautet

$$\int_{t'}^{\infty} C_c(t) dt = \frac{c_c(t')}{\lambda_c} \quad (35)$$

$$\int_{t'}^{\infty} t \cdot C_c(t) dt = \frac{c_c(t')}{\lambda_c} \left(t' + \frac{1}{\lambda_c} \right) \quad (36)$$

In Summenschreibweise läßt sich Glg. (34) jetzt wie folgt formulieren:

$$\tau_v = \frac{\sum_{i=0}^M C_{c,i} \cdot \tau_i \cdot \Delta\tau + \frac{c_c(t')}{\lambda_c} \left(t' + \frac{1}{\lambda_c} \right)}{\sum_{i=1}^M C_{c,i} \cdot \Delta\tau + \frac{c_c(t')}{\lambda_c}} \quad (37)$$

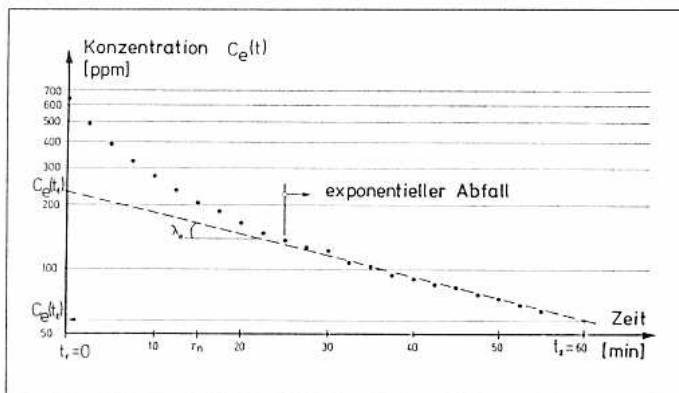


Bild 9: Spurengaskonzentration im Abluftkanal nach der Abklingmethode in einem $\ln c(t)$, t -Diagramm gemäß Tabelle 1 (nach Sandberg, 1984a)

Die Zeit t' ist die Endzeit der Messung, $t' = M \cdot \Delta\tau$; M entspricht der Anzahl der Meßpunkte. Am Beispiel der Auswertung einer Meßreihe (nach Sandberg, 1984 a) sollen die obigen Ausführungen vertieft werden. Tabelle 1 gibt die Meßpunkte und Bild 9 die entsprechende grafische Darstellung im $\ln c(t)$, t -Diagramm wieder.

Gemäß Bild 9 ergibt sich λ_c zu

$$\lambda_c = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{c_c(t_1)}{c_c(t_2)} = \frac{1}{1h} \cdot \ln \frac{230 \text{ ppm}}{59 \text{ ppm}} = 1,36 \text{ h}^{-1}$$

Die Extrapolation zur Berechnung der Fläche unterhalb der Konzentrations-/Zeitkurve (area under the curve) ergibt

$$\frac{c_c(t')}{\lambda_c} = \frac{64}{1,36} = 47 \text{ ppm} \times h$$

Die Extrapolation für das Moment 1. Ordnung ergibt

$$\frac{c_c(t')}{\lambda_c} \left(t' + \frac{1}{\lambda_c} \right) = 47 \times \left(\frac{55}{60} + \frac{1}{1,36} \right) = 77,6 \text{ (ppm} \times h^2)$$

Das Durchschnittsalter der Raumluft τ_v ist dann nach Glg. (37)

$$\tau_v = \frac{49 + 77,6}{180 + 47} = 0,56 \text{ h}$$

Und der Luftaustauschwirkungsgrad η_a ist nach Glg. (16b)

$$\eta_a = \frac{0,25}{2 \cdot 0,56} = 0,22$$

Tabelle 1: Meßprotokoll nach der Spurengas-Abklingmethode (aus Sandberg, 1984a)

Nominale Zeitkonstante:	$\tau_n = 0.25 \text{ (h)} = 15 \text{ min.}$		
Meßintervall:	$\Delta\tau = 2.5 \text{ min.}$		
Meßzeit:	$\tau_m = 55 \text{ min.}$		
Meßpunkt	τ_i [min]	C_i [ppm]	$C_i \cdot \tau_i$ [ppm·min]
0	0	654	0
1	2.5	491	1228
2	5.0	393	1965
3	7.5	326	2445
4	10.0	271	2710
5	12.5	234	2925
6	15.0	207	3105
7	17.5	188	3290
8	20.0	165	3300
9	22.5	147	3308
10	25.0	137	3425
11	27.5	127	3492
12	30.0	122	3660
13	32.5	106	3445
14	35.0	103	3605
15	37.5	95	3563
16	40.0	90	3600
17	42.5	85	3612
18	45.0	83	3735
19	47.5	78	3705
20	50.0	74	3700
21	52.5	69	3623
22	<u>55.0</u>	<u>64</u>	<u>3520</u>
		$\Sigma C_i = 4309$	$\Sigma C_i \cdot \tau_i = 70961$

$$\Sigma C_i \Delta\tau = 4309 \times \frac{2,5}{60} = 180 \text{ (ppm} \times h)$$

$$\Sigma C_i \cdot \tau_i \cdot \Delta\tau = \frac{70961}{60} \times \frac{2,5}{60} = 49 \text{ (ppm} \times h^2)$$

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des IEA-Annex 18 „Demand Controlled Ventilating Systems“ und wurde von der PBE Jülich im Auftrag des BMFT gefördert. Herrn Feustel vom Centro Comune di Ricerca in Ispra (I) danke ich für die Diskussion zur Übersetzung des englischen Fachvokabulars. Insbesondere danke ich Herrn N. Breum vom Danish Nat. Inst. Occ. Health in Hellerup (DK) und Herrn M. Sandberg vom Nat. Swedish Inst. for Building Research in Stockholm (S) für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und für ihre wertvollen Hinweise.

Formelzeichen

$F(t)$	Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit
M	Spurengasmasse
$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom
V_{RA}	Raumvolumen
τ	Zeitkonstante allgemein
τ_n	nominale Zeitkonstante
τ_p	Alter der Luft im Punkt P
τ_r	Verweilzeit der Luft allgemein
$\tau_{r,p}$	Verweilzeit der Luft für Luftmoleküle, die durch den Punkt P gehen
$\tau_{rr,p}$	verbleibende Verweilzeit der Luft für Luftmoleküle, die durch den Punkt P gehen
$\tau_{r,v}$	durchschnittliche Verweilzeit der Luft im Raum
c	Spurengaskonzentration (Masse/Volumen)
$f(t)$	Häufigkeitsfunktion
n	globale Luftwechselzahl

t	Zeit
ε_a	lokale Luftaustauschkennzahl
η_a	Luftaustauschwirkungsgrad
λ_c	Betrag der Steigung der Konzentrationsabfallkurve
$\mu^{(0)}, \mu^{(1)}$	Anfangsmoment 0-ter Ordnung und 1-ter Ordnung

Indizes unten

Aus	aus dem Raum ausströmend
e	Auslaßkanal
p	am Ort P
v	zeitlicher Mittelwert vom Volumen $\dot{V}$

Indizes (oben)

o	zur Zeit $t = 0$
---	------------------

Literatur:

- Bartsch, H.-J.: 1982. Taschenbuch Mathematischer Formeln, VEB Verlag, Leipzig
- Breum, N. O.; Skotte, J.: 1987. Måling af Ventilationseffektivitet, Arbejds-miljøfondet, København (in dänisch)
- Sandberg, M.; Sjöberg, M.: 1983. The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Build. & Environ., Vol. 18, No. 4, pp. 181–197
- Sandberg, M.: 1984a. A Proposed Method for: Determination of Mean Age of Air in a Ventilated Space, Nordtest-Project: 366–82 Part 2. The National Swedish Institute for Building Research, 1984–10-31.
- Sandberg, M.: 1984 b. Distribution of Ventilation Air and Contaminants in Ventilated Rooms – Theory and Measurements, Dissertation, Technische Hochschule Stockholm (in schwedisch)
- Sandberg, M.: 1988. Persönliche Mitteilung.
- Skåret, E.; Mathisen, H. M.: 1981. Ventilation Efficiency, Intern. Symp. on Indoor Pollution, Health and Energy Conservation. Massachusetts, 13.–16. Okt. 1981
- Skåret, E.; Mathisen, H. M.: 1985. Test Procedures for Ventilation Effectiveness. Field Measurements, CIB, Trondheim, Norway 22.–23. Mai 1985, p. 64–75
- Skåret, E.: 1986. Ventilation by Displacement-Characterization and Design Implications, Ventilations '85 (Chemical Engineering Monographs 24), p. 827–841.

Willigert Raatschen

Was ist Lüftungseffektivität? 3. Teil*

Die Ausführungen zum Thema „Was ist Lüftungseffektivität“ bestehen aus drei Teilen. Im ersten Teil wurden die Möglichkeiten zur Messung des Luftaustauschs von Räumen und Gebäuden mit einem und mehreren Spurengasen beschrieben. Der zweite Teil behandelte die Kenngrößen „Alter der Luft“ und „Luftaustauschwirkungsgrad“ zur Charakterisierung der Luftströmung im Raum. Diese wurden anhand der Spurengasmessung nach der Abklingmethode an Beispielen erklärt.

Der dritte Teil erläutert die Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades nach der Spurengasmethode bei konstantem Volumenstrom und nach der Puls-Methode. Anschließend werden drei Kenngrößen zur Abfuhr von Schadstoffen im Raum vorgestellt, die Lüftungswirksamkeit, der Lüftungswirkungsgrad und der Luftqualitätsindex.

What is ventilation efficiency?

In the third and last part of this series the „age concept“ and the „air exchange efficiency“ are outlined for the constant concentration and the pulse method. Different air flow and contaminant flow pattern are discussed. Suitable parameters to characterize the contaminant flow like „turnover time“, „contaminant removal efficiency“, „air quality index“, and „ventilation efficiency“ are described. The definitions are derived and the measuring technique is explained.

Efficacité de la ventilation, c'est quoi?

La présente série d'articles comprend trois parties, qui résument surtout des publications de source étrangère, ayant pour objet le renouvellement d'air, le coefficient d'utilisation de la ventilation, ainsi que le coefficient d'efficacité de la ventilation. Sans que cette étude soit exhaustive, la première partie porte sur les différentes méthodes de mesure du renouvellement d'air par le biais de gaz traceurs pour bâtiments à une seule cellule, respectivement pour bâtiments à plusieurs cellules interconnectées. Dans la mesure où cela était possible, les méthodes sont démontrées moyennant des exemples.

La deuxième partie porte sur les bases théoriques, permettant de mieux comprendre des notions telles que „l'âge de l'air“ et „le coefficient d'efficacité du renouvellement d'air“, qui elles caractérisent la circulation de l'air dans l'espace et la qualité du renouvellement d'air. L'exemple de la méthode de dissipation du gaz traceur permet de définir ces notions, ce qui est encore approfondi à l'aide de procès-verbaux d'essais.

La troisième partie traite de la méthode de mesure, permettant de déterminer la concentration constante du gaz traceur, ainsi que de la méthode basée sur l'étude des effets d'un gaz traceur injecté dans la ventilation, les deux méthodes étant validées par des exemples respectifs. La dernière partie porte sur l'évacuation d'éléments polluants de l'espace et sur les définitions qui s'emploient couramment dans ce contexte, telles que „coefficient d'efficacité de la ventilation“ et „coefficient d'efficacité de l'évacuation d'éléments polluants“.

3.4.6 Spurengasmethode mit konstantem Volumenstrom

Eine zweite Möglichkeit zur Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades ist die Spurengasmeßmethode mit konstanter Zufuhr von Spurengas in den Raum oder in den Zuluftkanal (source method or step-up method). Hier wird zur Zeit $t = 0$ die Spurengaszufuhr gestartet. Im Raum wird sich jetzt die Spurengaskonzentration erhöhen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Konzentrationen verändern sich zeitlich nicht mehr. Lokal werden sie sich nur anfangs auf Grund der unterschiedlichen Durchmischung unterscheiden. Bild 10 zeigt einen möglichen Konzentrationsverlauf im Punkt P (vergl. Bild 5, §§ 6/88).

Auch hier muß der Massenstrom des Spurengases nicht gemessen werden. Die Endkonzentrationen im stationären Zustand werden allerdings durch seine Größe beeinflusst.

Der prozentuale Anteil der Luft im Punkt P mit einem Alter kleiner als t , die sogenannte Verteilungsfunktion $F(t)$ ist hier

$$F(t) = \frac{C_p(t)}{C_p^\infty} \quad (38)$$

Das Durchschnittsalter der Luft τ_p im Punkt P ist nach Glg. (20) (siehe §§ 6/88)

$$\begin{aligned} \tau_p &= \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = \int_0^\infty (1 - F(t)) dt = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C_p(t)}{C_p^\infty}\right) dt \\ &= \frac{1}{C_p^\infty} \int_0^\infty (C_p^\infty - C_p(t)) dt \end{aligned} \quad (39)$$

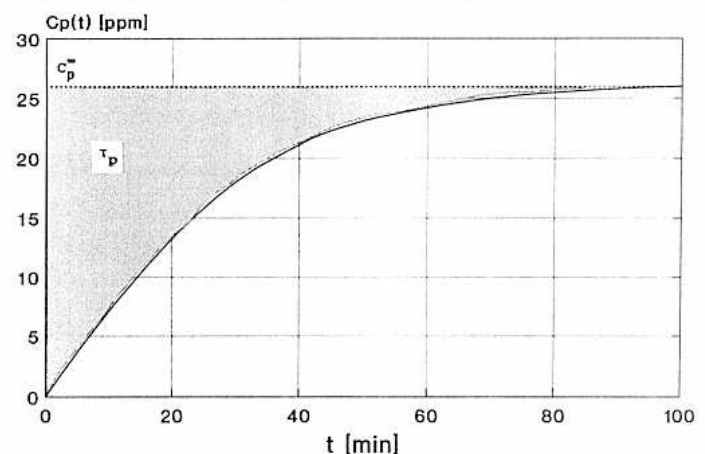


Bild 10: Spurengaskonzentrationsverlauf im Punkt P bei konstanter Injektionsrate von Spurengas.

Man erkennt, daß τ_p der auf C_p^∞ normierten Fläche über der Konzentrationskurve in Bild 10 entspricht (area above the curve). Die Bestimmung des Durchschnittsalters der Raumlufte τ_v ergibt sich über eine Massenbilanz für den Raum. Kennzeichnet $M(t)$ die Spurengasmasse im Raum, so ist

$$M(t) = M_{\text{Ein}}(t) - M_{\text{Aus}}(t), \quad (40)$$

wobei sich die bis zum Zeitpunkt t ausgeträumte Masse an Spurengas unter der Annahme vernachlässigbarer Leckverluste ergibt zu

$$M_{\text{Aus}}(t) = \dot{V}_L \cdot \int_0^t C_c(t) dt \quad (41)$$

* Manuskript eingereicht im April 1988
Der 1. Teil dieses Beitrages ist in der Ki-Mai-Ausgabe und der 2. Teil in der Ki-Juni-Ausgabe 1988 erschienen.

Bei konstantem einströmenden Spurengasmassenstrom ist die eingetretene Spurengasmenge

$$M_{\text{Ein}}(t) = \dot{m} \cdot t = \dot{V}_L \cdot C_e^\infty \cdot t \quad (42)$$

Der prozentuale Anteil der gesamten Spurengasmoleküle im Raum mit einem Alter kleiner als t ist

$$F(t) = \frac{M(t)}{M^\infty} \quad (43)$$

M^∞ ist die im Raum befindliche Spurengasmasse im stationären Zustand ($t \rightarrow \infty$).

Glg. (40–42) in Glg. (43) eingesetzt ergibt:

$$F(t) = \frac{\int_0^t \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt} \quad (44)$$

Die zugehörige Häufigkeitsfunktion $f(t)$ ergibt sich zu

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt} \quad (45)$$

Das Durchschnittsalter errechnet sich jetzt zu

$$\tau_v = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = \frac{\int_0^\infty t \cdot \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt} \quad (46)$$

Wie schon in Kap. 3.3 (siehe §§ 6/88) erwähnt, ist der Luftaustauschwirkungsgrad η_a eine Kennzahl dafür, wie nahe die tatsächliche Luftströmung der Kolbenströmung als bester Strömungsform kommt, d. h. $\eta_a = 1$ für Kolbenströmung. Das Durchschnittsalter $\tau_{v,D}$ der Raumluft für Kolbenströmung entspricht genau dem halben Wert der nominalen Zeitkonstanten τ_n . Mit Glg. (16b) (§§ 6/88) ergibt sich der Luftaustauschwirkungsgrad zu

$$\eta_a = \frac{\tau_{v,D}}{\tau_v} = \frac{\tau_n}{2 \tau_v} \quad (47)$$

Wenn $\tau_{v,D}$ nach der Spurengasmethode mit konstantem Volumenstrom bestimmt werden soll, stellt sich bei Kolbenströmung der in Bild 11 dargestellte Konzentrationsverlauf im Auslaßkanal ein.

Glg. (46) angewandt auf die Verdrängungsströmung gemäß Bild 11 ergibt.

$$\tau_{v,D} = \frac{\int_0^{\tau_n} t \cdot (1-0) dt + \int_{\tau_n}^\infty 0 dt}{\int_0^{\tau_n} dt + \int_{\tau_n}^\infty 0 dt} = \frac{\tau_n^2}{2\tau_n} = \frac{\tau_n}{2} \quad (48)$$

Glg. (48) führt wie erwartet auf analytischem Weg zu demselben Ergebnis, wie die Überlegungen zur Umformung von Glg. (47). Die nominale Zeitkonstante τ_n ergibt sich zu

$$\tau_n = \frac{V_{RA}}{\dot{V}_L} = V_{RA} \cdot \frac{C_e^\infty}{\dot{m}} = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt \quad (49)$$

Mit den Glg. (16b) (§§ 6/88), (46) und (49) errechnet sich der Luftaustauschwirkungsgrad zu

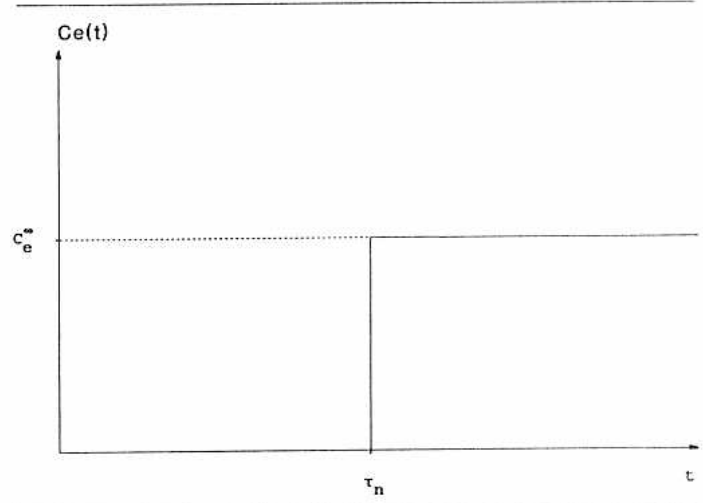


Bild 11: Konzentrationsverlauf des Spurengases im Abluftkanal bei Kolbenströmung, wenn bei $t = 0$ die Einspritzung von Spurengas erfolgt.

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2 \cdot \tau_v} = \frac{\left[\int_0^\infty \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt \right]^2}{2 \cdot \int_0^\infty t \cdot \left(1 - \frac{C_e(t)}{C_e^\infty}\right) dt}$$

3.4.7 Die Spurengas-Pulsmethode (tracer gas pulse method)

Hier wird kurzzeitig eine kleine Menge Spurengas in den Zuluftkanal gespritzt. Kurzzeitig heißt, daß die Einspritzzeit wesentlich kürzer als die nominale Zeitkonstante τ_n ist, und es muß gewährleistet sein, daß sich am Austritt des Zuluftkanals das Spurengas bereits homogen mit der Zuluft vermischt hat. Bild 12 zeigt den Spurengaskonzentrationsverlauf an einem beliebigen Punkt P des Raumes. Die Einspritzung erfolgt zur Zeit $t = 0$.

Der prozentuale Anteil $F(t)$ der Luft im Punkt P mit einem Alter kleiner als t berechnet sich zu

$$F(t) = \frac{\int_0^t C_p(t) dt}{\int_0^\infty C_p(t) dt} \quad (50)$$

Über Glg. (19) (§§ 6/88) ergibt sich für die Häufigkeitsfunktion $f(t)$

$$f(t) = \frac{C_p(t)}{\int_0^\infty C_p(t) dt} \quad (51)$$

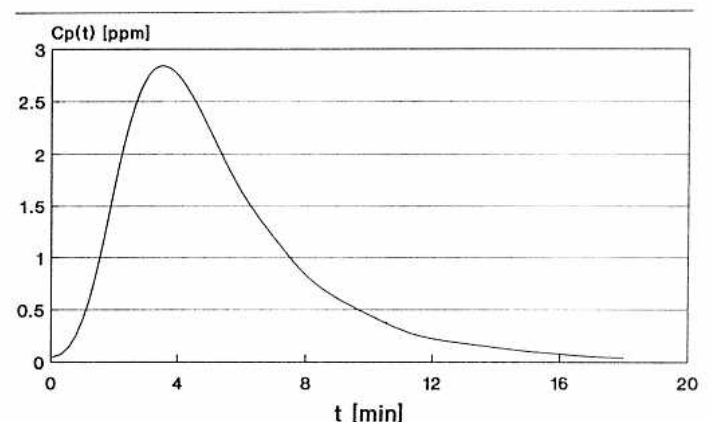


Bild 12: Spurengaskonzentrationsverlauf im Punkt P eines Raumes nach der Puls-Methode

Mit Glg. (20) (§§ 6/88) berechnet sich das Durchschnittsalter τ_p der Raumluft im Punkt p für die Puls-Methode zu

$$\tau_p = \frac{\int_0^\infty t \cdot C_p(t) dt}{\int_0^\infty C_p(t) dt} = \frac{\mu_p^{(1)}}{\mu_p^{(0)}} \quad (52)$$

Zur Berechnung des Luftaustauschwirkungsgrades η_a muß das Durchschnittsalter τ_v aller Moleküle im Raum bestimmt werden. Dieses sollte möglichst wiederum über eine Konzentrationsmessung im Auslaßkanal realisierbar sein. Über den Zusammenhang zwischen der Altersverteilungsfunktion der Raumluft (cumulative distribution function of the *internal* air) $F_v(t)$ und der Altersverteilungsfunktion der Abluft (cumulative distribution function of the *exhaust* air) $F_e(t)$ läßt sich nach Sandberg u. a., 1983 das Durchschnittsalter der Raumluft folgendermaßen formulieren

$$\tau_v = \frac{\int_0^\infty t \cdot f_v(t) dt}{\int_0^\infty f_v(t) dt} = \frac{1}{2 \cdot \tau_n} \cdot \frac{\int_0^\infty t^2 \cdot f_e(t) dt}{\int_0^\infty f_e(t) dt} \quad (53)$$

Die Altersverteilungsfunktion im Abluftkanal $F_e(t)$ ist

$$F_e(t) = \frac{\int_0^t C_e(t) dt}{\int_0^\infty C_e(t) dt} \quad (54a)$$

Die zugehörige Häufigkeitsfunktion $f_e(t)$ ist mit Glg. (19) (§§ 6/88)

$$f_e(t) = \frac{C_e(t)}{\int_0^\infty C_e(t) dt} \quad (54b)$$

womit sich das Durchschnittsalter der Raumluft zu

$$\tau_v = \frac{1}{2 \cdot \tau_n} \cdot \frac{\int_0^\infty t^2 \cdot C_e(t) dt}{\int_0^\infty C_e(t) dt} = \frac{1}{2 \cdot \tau_n} \cdot \frac{\mu_e^{(2)}}{\mu_e^{(0)}} \quad (55)$$

berechnen läßt.

Die nominale Zeitkonstante τ_n , welche sich allgemein (bei Zufuhr des Spurengases im Zuluftkanal) aus

$$\tau_n = \frac{\int_0^\infty t \cdot f_e(t) dt}{\int_0^\infty f_e(t) dt} \quad (57)$$

berechnet, ergibt für die Puls-Methode

$$\tau_n = \frac{\int_0^\infty t \cdot C_e(t) dt}{\int_0^\infty C_e(t) dt} = \frac{\mu_e^{(1)}}{\mu_e^{(0)}}$$

Zusammenfassend ergibt sich der Luftaustauschwirkungsgrad η_a dann zu

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2 \tau_v} = \frac{(\mu_e^{(1)})^2}{\mu_e^{(0)} \cdot \mu_e^{(2)}} \quad (58)$$

4. Lüftungswirksamkeit, Lüftungswirkungsgrad und Luftqualitätsindex

Um das Lüftungsverhalten in bezug auf Schadstoffentfernung zu beschreiben, sind weitere Parameter erforderlich. Einige Schadstoffe sind mehr oder weniger gleichmäßig im Raum verteilt und verhalten sich nahezu so wie die strömenden Luftmengen (passive Schadstoffe). In diesem Fall ist der Luft- und der Schadstofftransport identisch.

Viele Schadstoffe entwickeln allerdings ihr eigenes Strömungsmuster, welches sich mit dem der zirkulierenden Luft überlagert, Bild 13. In diesem Sinne kann auch Überschußwärme nach Skåret, 1986 wie ein Schadstoff behandelt werden, in dem die Konzentration durch die Übertemperatur ersetzt wird.

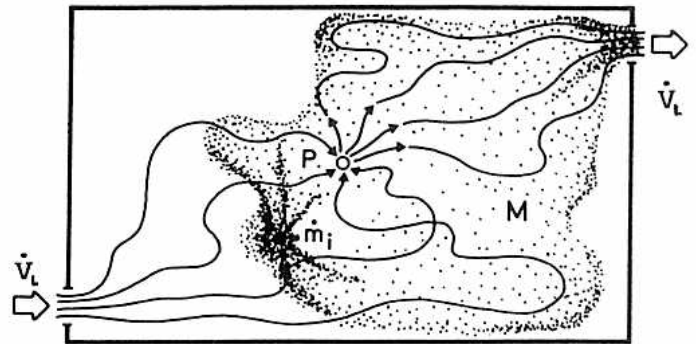


Bild 13 Raumströmung und Schadstoffströmung bilden unterschiedliche Strömungsmuster (Sandberg, 1984)

Als Lüftungswirksamkeit ϵ_v^c (ventilation effectiveness) bezeichnet man nun das Verhältnis von Schadstoffkonzentration c_e im Abluftkanal zu der mittleren Schadstoffkonzentration c_v im Raum bei stationärem Zustand. Der Hochindex „c“ steht für Schadstoff (contaminant) und der Tiefindex „v“ kennzeichnet wieder einen Mittelwert über das gesamte Raumvolumen.

$$\epsilon_v^c = \frac{C_e^c}{C_v^c} \quad (56)$$

Die so definierte Lüftungswirksamkeit ϵ_v^c ist ähnlich dem Kehrwert der in der deutschen Fachsprache benutzten Kenngröße Raumbelastungsgrad ζ

$$\zeta = \frac{C_{Az} - C_s}{C_e - C_s} \quad (59b)$$

C_{Az} entspricht der Schadstoffkonzentration in der Aufenthaltszone. Häufig ist der Schadstoffgehalt der Zuluft Null $C_s = 0$, so daß sich bei Kehrwertbildung Glg. (56) ergibt. Glg. (56) läßt sich folgendermaßen umformen:

Im stationären Fall ist

$$\dot{m} = \dot{V}_L \cdot C_e^c \quad (58)$$

Die Durchschnittskonzentration des Schadstoffes im Raum beträgt

$$C_v^c = \frac{M^c}{V_{RA}} \quad (59)$$

Mit Glg. (12) (siehe §§ 6/88), (58) und (59) folgt

$$\frac{C_e^c}{C_v^c} = \frac{\dot{m} V_{RA}}{\dot{V}_L M^c} = \tau_n \cdot \frac{\dot{m}}{M^c} \quad (62)$$

Wenn mit τ_i^c jetzt die mittlere Zeit bezeichnet wird, welche die Schadstoffmoleküle brauchen, um von der Quelle zum Abluftkanal zu strömen, so ist

$$M^c = \dot{m} \cdot \tau_i^c \quad (61)$$

τ_i^c heißt Umsatzzeit (turnover time) und entspricht einer durchschnittlichen Verweilzeit des Schadstoffes im Raum, also der Zeitspanne, die ein Schadstoffmolekül von der Quelle zum Abluftkanal braucht. Im Gegensatz hierzu steht die Verweilzeit τ_r der Luft (vergl. Kap. 3.4 §§ 6/88), welche die Zeitspanne vom Zuluft- bis in den Abluftkanal beschreibt.

Die Lüftungswirksamkeit ϵ_v^c aus Glg. (56) läßt sich jetzt mit Glg. (60) + (61) ebenso als Verhältnis von nominale Zeitkonstante τ_n

des Lüftungsstromes zur Verweilzeit des Schadstoffes im Raum τ_r definieren (Skåret u. a., 1985)

$$\varepsilon_v^c = \frac{C_v^c}{C_r^c} = \frac{\tau_n}{\tau_r^c} \quad (62)$$

Die nominale Zeitkonstante τ_n ist bei einer Lüftungsanlage eine bekannte Größe.

Die Umsatzzeit des Schadstoffes τ_r^c im Raum ist auf die gleiche Weise meßbar wie die Verweilzeit der Luft τ_r im Raum. Entweder wird im Abluftkanal die Schadstoffkonzentration direkt gemessen, oder die Schadstoffgase werden an der Entstehungsquelle mit Spurengas geimpft, wobei darauf zu achten ist, daß die Ausbreitungscharakteristika von Spurengas und Schadstoff identisch sind. Anschließend wird dann die Spurengaskonzentration im Abluftkanal gemessen. Die Messung von τ_r^c setzt voraus, daß zum einen die Schadstoffquelle bekannt ist und das Lüftungssystem über einen Abluftkanal verfügt. Bei mehreren Abluftdurchlässen muß der Volumenstrom und die Spurengaskonzentration in jedem Kanal gemessen werden.

Die Lüftungswirksamkeit ε_v^c gibt zwar die Güte eines Lüftungssystems zur Abfuhr von Schadstoffen an, sie ist aber kein Wirkungsgrad, da ihr Wertebereich von null bis unendlich geht.

Bei vollständiger Durchmischung des Schadstoffes mit der Raumluft ist $\tau_n \equiv \tau_r^c$, womit $\varepsilon_v^c = 1$ wird. Setzt sich der Schadstoff z. B. in Bodennähe ab und kann nur schwer von der Raumluft zum Abluftkanal transportiert werden, so ist seine Verweilzeit τ_r^c größer als die Verweilzeit $\tau_{r,v}$ der Luft, womit $\varepsilon_v^c < 1$ wird. Eine Schadstoffquelle in der Nähe des Abluftkanals könnte im anderen Extrem eine sehr schnelle Schadstoffabfuhr bewirken, womit $\tau_r^c < \tau_n$ und $\varepsilon_v^c > 1$ wird. Generell sind Lüftungswirksamkeiten größer 1 erstrebenswert.

Hier wird jetzt ein prinzipieller Unterschied zwischen Luftaustauschwirkungsgrad η_a (vergl. Kap. 3.3 § 6/88) und der Lüftungswirksamkeit ε_v^c deutlich: bei vollständiger Durchmischung ist $\eta_a = 0,5$, allerdings $\varepsilon_v^c = 1$.

Um zur Beschreibung der Schadstoffabfuhr ebenfalls zu einem Wirkungsgrad (Wertebereich zwischen 0 und 1) zu gelangen, argumentiert Skåret, 1986 so: bei vollständiger Durchmischung ist die Wahrscheinlichkeit, daß Schadstoffmoleküle im Raum bleiben, genauso groß als wenn sie diesen verlassen, also 50%. Hier müßte jetzt ein Wirkungsgrad, den wir η_v^c nennen, den Wert 0,5 haben. Wenn im nächsten Fall die Umsatzzeit τ_r^c eines Schadstoffes im Raum null ist, der Schadstoff also optimal abgeführt wird (etwa über eine Abzugshaube), dann ist die Wahrscheinlichkeit der Schadstoffmoleküle zum Verlassen des Raumes gleich 1.

Somit läßt sich ein Lüftungswirkungsgrad (ventilation efficiency) in bezug auf die Schadstoffabfuhr (contaminant removal efficiency) η_v^c definieren zu:

$$\eta_v^c = \frac{\varepsilon_v^c}{1 + \varepsilon_v^c} \quad (63)$$

Hiermit müßte der Unterschied zwischen Wirksamkeit und Wirkungsgrad deutlich geworden sein¹).

Der Lüftungswirkungsgrad hat sich allerdings noch nicht so durchgesetzt. Da für die Bewohner die Qualität der Luft in der Aufenthaltszone ausschlaggebender als ein Mittelwert vom gesamten Raum ist, hat sich in Skandinavien der Begriff „Luftqualitätsindex ε_v (air quality index) eingebürgert. Er ist definiert als das Verhältnis von Schadstoffkonzentration c_c im Abluftkanal zur Schadstoff-

konzentration C_{Az} in der Aufenthaltszone (Az) bei stationären Bedingungen:

$$\varepsilon_v = \frac{C_c}{C_{Az}} \quad (64)$$

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des IEA-Annex 18 „Demand Controlled Ventilating Systems“ und wurde von der PBE Jülich im Auftrag des BMFT gefördert. Ich danke Herrn N. Breum vom Danish Nat. Inst. Occ. Health in Hellerup (DK) und Herrn M. Sandberg vom Nat. Swedish Inst. for Building Research in Stockholm (S) für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und für ihre wertvollen Hinweise. Besonders Dank möchte ich Herrn L. Trepte, Dornier System GmbH, Friedrichshafen, für die zahlreichen Diskussionen und Impulse zu diesem Thema sagen.

Formelzeichen

$F(t)$	– Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit
M	– Spurengasmasse
$\dot{V}_L$	– Luftvolumenstrom
V_{RA}	– Raumvolumen
c	– Konzentration [Masse/Volumen]
$f(t)$	– Häufigkeitsfunktion
$\dot{m}$	– zeitlich konstanter Spurengasmassenstrom
n	– globale Luftwechselzahl
t	– Zeit
Δt	– Zeitintervall, in dem Spurengas injiziert wird
ε_v	– Luftqualitätsindex
ε_v^c	– Lüftungswirksamkeit
η_a	– Luftaustauschwirkungsgrad
η_v^c	– Schadstoffabfuhrwirkungsgrad
ζ	– Raumbelastungsgrad
τ_n	– nominale Zeitkonstante
τ_p	– Durchschnittsalter der Luft im Punkt P
τ_r	– Verweilzeit
τ_r^c	– Umsatzzeit
τ_v	– Durchschnittsalter der Raumluft
$\mu^{(0)}, \mu^{(1)}, \mu^{(2)}$	– Anfangsmomente 0-ter, 1-ter und 2-ter Ordnung

Indizes unten

Aus	– aus dem Raum ausgeströmt
Az	– Aufenthaltszone
Ein	– in den Raum eingeströmt
D	– bei Verdrängungsströmung (displacement)
e	– im Abluftkanal (exhaust duct)
p	– im Punkt P
s	– im Zuluftkanal (supply duct)
v	– Durchschnittswert des gesamten Volumens

Index oben

∞	– für $t = \infty$
c	– Schadstoff (contaminant)

Literatur:

- Breum, N. O.; Skotte, J.: 1987 Måling af Ventilationseffektivitet, Arbejdsmiljøfondet, København (in dänisch)
- Skåret, E.; Mathisen, H. M.: 1985. Test Procedures for Ventilation Effectiveness, CIB, Trondheim, Norway, 22.–23. Mai 1985
- Sandberg, M.; Sjøberg, M.: 1983. The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Build. & Environ., Vol. 18, No. 4, p. 181–197.
- Skåret, E.: 1986. Ventilation by Displacement-Characterization and Design Implications, Ventilation '85 (Chemical Engineering Monographs 24), p. 827–841.
- Sandberg, M.: 1984. Distribution of Ventilation Air and Contaminants in Ventilated Rooms – Theory and Measurements, Dissertation, Techn. Hochschule Stockholm (in schwedisch).

¹ Diese hier vorgenommene strikte Trennung zwischen Wirkungsgrad und Wirksamkeit sollte nicht darüber hinwegtäuschen, daß es in der Literatur genügend Lüftungswirkungsgradkreationen gibt, deren Wertebereich den Wert 1 übersteigt.

Errata:

Auf Seite 6, linke Spalte, Formel oben bitte ersetzen

$$n = \frac{\ln \frac{c_1(t)}{c_2(t)}}{t_2 - t_1} = \frac{\ln \frac{1.9}{0.31}}{420 - 120} = 0.006 \frac{1}{\text{min}} = 0.36 \frac{1}{\text{h}}$$