

Messung der Lüftungseffektivität im Labormaßstab mit Spurengasen

Es werden erste Meßergebnisse eines Forschungsvorhabens vorgestellt, in dem Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Messungen der Lüftungseffektivität und der Lüftungswirksamkeit in der industriellen Praxis geklärt werden sollen*). Messungen der Lüftungseffektivität haben das Ziel, den lokalen Luftaustausch an bestimmten Stellen im Raum quantitativ zu beurteilen. Bei der Ermittlung der Lüftungswirksamkeit geht es hingegen darum, die Ausbreitung und Abfuhr von in Räumen emittierten Schadstoffen zu erfassen. Im vorliegenden Beitrag werden die derzeit eingesetzten Methoden zur Bestimmung der Lüftungseffektivität an einem Quelllüftungs- und zwei Mischlüftungssystemen untersucht.

Die Lüftungseffektivität läßt sich durch Auswertung zeitlicher Konzentrationsverläufe von künstlich in den Raum eingebrachten Spurengasen bestimmen. Bei den hier vorgestellten Lüftungseffektivitätsmessungen erwiesen sich die beiden zur Zeit am häufigsten verwendeten Spurengase SF_6 und N_2O in jeder Beziehung als gleichwertig. Weiterhin zeigte sich, daß die sogenannte Abkling-Methode (Step-down-Verfahren) und die Methode der konstanten Spurengaszugabe (Step-up-Verfahren) bei Einhaltung der erforderlichen Versuchsrandbedingungen im Rahmen der Meßgenauigkeit identische Ergebnisse liefern.

Dipl.-Ing. Andreas Jung, Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik, Lehrgebiet Klimatechnik (Prof. Dr.-Ing. M. Zeller), RWTH Aachen

Das „Alter der Luft“

Die Lüftungseffektivität von belüfteten Räumen läßt sich mit Hilfe des sogenannten „Alters der Luft“ bestimmen [1; 2; 3; 4]. Das „Alter der Luft“ τ_p ist eine statistische Größe und ein zeitliches Maß dafür, wie lange Luft-

moleküle im Durchschnitt brauchen, um vom Zuluftdurchlaß zu einer bestimmten Stelle p im Raum zu gelangen (siehe Bild 1). Je kürzer diese Zeit ist, desto besser ist der Luftaustausch an der betreffenden Stelle p. Um die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse bei anderen Luftwechseln zu ermöglichen, wird das lokale Alter τ_p auf die nominale Zeitkonstante τ_n bezogen. Die Größe τ_n stellt zum einen den Kehrwert des Luftwechsels n dar ($\tau_n = 1/n$), zum anderen entspricht τ_n aber auch dem „Alter der Luft“ im Abluftkanal τ_e ($\tau_e = \tau_n$).

*) Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) und der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik (FLT) geförderten Vorhabens durchgeführt.

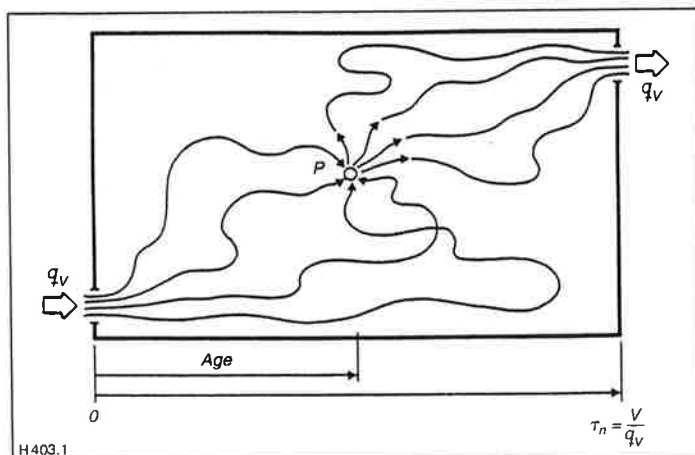


Bild 1: Strompfade von Luftmolekülen in einem Raum zu einem Punkt p (Konzept des „Alters der Luft“) [5]

Die Beurteilung der lokalen Lüftungseffektivität erfolgt daher mittels des sogenannten „lokalen Luftaustauschindex ϵ_p “

$$\epsilon_p = \frac{\tau_n}{\tau_p} = \frac{\tau_e}{\tau_p} \quad (1)$$

Die Beurteilung der lokalen Lüftungswirksamkeit erfolgt im Unterschied dazu mittels des sogenannten „lokalen Luftqualitätsindex ϵ_p^c “ (Kehrwert des in Deutschland bekannten Raumbelastungsgrades)

$$\epsilon_p^c = \frac{c_e - c_s}{c_p - c_s} \quad (2)$$

c_e bezeichnet die Konzentration eines bestimmten Schadstoffes im Abluftkanal („exit“), c_s die Konzentration in der Zuluft („supply“) und c_p die Schadstoffkonzentration am Punkt p (siehe auch Bild 2).

Bei beiden Kennzahlen ϵ_p und ϵ_p^c ist ein möglichst hoher Wert anzustreben. Abhängig von der Luftführungsart stellen sich folgende Werte ein:

Quelllüftung:	$\epsilon_p > 1$ und $\epsilon_p^c > 1$
ideale Mischlüftung:	$\epsilon_p = 1$ und $\epsilon_p^c = 1$
Kurzschluß:	$\epsilon_p < 1$ und $\epsilon_p^c < 1$

Aus (1) und (2) erkennt man, daß in bezug auf die Darstellung der Ergebnisse von Lüftungseffektivitätsmessungen die gleiche Herangehensweise vorliegt, wie bei Messungen zur Lüftungswirksamkeit [6]: Die jeweilige lokal im Raum gemessene physikalische Größe (lokales Alter bzw. Schadstoffkonzentration) wird auf die entsprechende, im Abluftkanal gemessene Größe bezogen.

Messung des „Alters der Luft“

Das „Alter der Luft“ läßt sich mit Hilfe von drei verschiedenen aus der Verfahrenstechnik bekannten Verfahren ermitteln. Das Step-up, das Step-down und das Pulse Verfahren.

Beim Pulse-Versuch wird zum Zeitpunkt $t = 0$ ein kurzer „Puls“ eines Spurengases dem Zuluftstrom beigegeben. An Stellen von Interesse im Raum, d.h. insbesondere im Aufenthaltsbereich von Personen und im Abluftkanal, wird dann der Verlauf der Spurengaskonzentration mit einem IR-Gasanalytator aufgezeichnet. Bei den hier wie

dergegebenen Messungen ($n = 2,5 \text{ h}^{-1}$) sind die Konzentrationsverläufe an fünf Stellen im Raum und im Abluftkanal gemessen worden. Bei höheren Luftwechseln muß die Anzahl der Meßstellen entsprechend verringert werden, um aufgrund der endlichen Ansaug- und Meßzeiten des Gasanalysators eine Datenrate von mindestens drei Werten pro nominale Zeitkonstante und Meßstelle realisieren zu können.

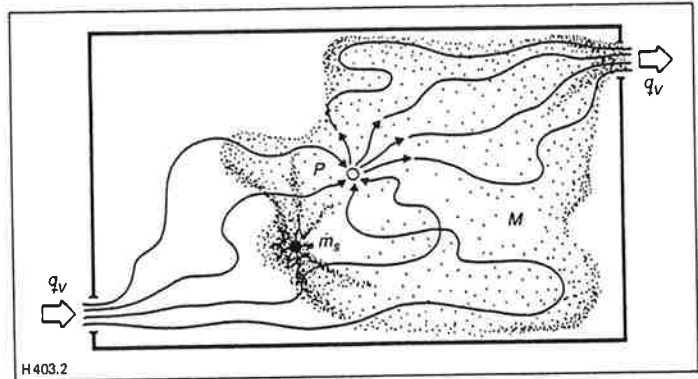
Die Konzentrationsverläufe wurden solange vermessen, bis sie wieder im sogenannten Hintergrundrauschen des Gasanalysators verschwunden waren. Bei Wahl dieser (nicht unbedingt notwendigen) Verfahrensweise [7] bewegen sich die Meßzeiten bei allen drei geschilderten Verfahren um $7 \tau_n$. Das Hintergrundrauschen des IR-Gasanalysators ist gerätespezifisch und hat seine Ursache in der Querempfindlichkeit der verwendeten optischen Filter gegenüber anderen in der Umgebungsluft enthaltenen Gasen, in erster Linie H_2O und CO_2 .

Beim Step-up-Verfahren wird vom Zeitpunkt $t = 0$ bis zum Abbruch der Messung ein konstanter Spurengas-Volumenstrom der Zuluft beigegeben. Hier wurde die Messung dann abgebrochen, wenn sich an allen Stellen des Raumes eine zeitlich konstante Endkonzentration eingestellt hatte. Dieser Zustand ist Voraussetzung für die sich unmittelbar anschließende Step-down-Messung, bei der zum Zeitpunkt $t = 0$ die Spurengaszufuhr gestoppt und der anschließende Konzentrationsabfall an den interessierenden Stellen im Raum aufgezeichnet wird. Das lokale Alter τ_p läßt sich dann bei allen drei Verfahren durch numerische Integration der gemessenen zeitlichen Konzentrationsverläufe bestimmen [8].

In Bild 3 sind beispielhaft dazu entsprechende Konzentrationsverläufe an einer bestimmten Stelle im Raum dargestellt. Bei allen hier vorgestellten Messungen wurde mit zwei Spurengasen (SF_6 und N_2O) zeitlich parallel gearbeitet. Während des gesamten Meßzeitraumes blieb die zu untersuchende Konfiguration im Raum unverändert. Auf diese Weise erhielt man insgesamt sechs Werte des lokalen Alters für eine bestimmte Stelle.

Diese Verfahrensweise hat die folgenden zwei Vorteile: Zum einen lassen sich Aussagen zur Reproduzierbarkeit des gemessenen lokalen Alters machen, d.h., falls alle anderen Versuchsrandbedingungen von Bedeutung (Konstanz der Volumenströme, der Zulufttemperatur, der Wandtemperaturen, der Spurengaszufuhr und des Hintergrundrauschens) eingehalten werden, ist diese Reproduzierbarkeit nur von der zeitlichen Stabilität der Raumluftströmung an der jeweiligen zu untersuchenden Stelle p abhängig. Zum anderen ist es möglich, sowohl die drei oben erläuterten Meßverfahren als auch die beiden Spurengase SF_6 und

Bild 2: Unterschiedliche Strompfade von Raumluft- und Schadstoffströmung [5]



N_2O direkt miteinander zu vergleichen. Es zeigte sich, daß sich SF_6 (Dichteverhältnis zu Luft: $d = 5,11$) und N_2O ($d = 1,53$) in bezug auf die Meßgenauigkeit des lokalen Alters nicht unterscheiden. Entsprechendes gilt für das Step-up- und das Step-down-Verfahren. Beim Pulse-Verfahren ergaben sich verfahrensbedingt aufgrund der für einen Pulse-Versuch vorgegebenen Auswertbeziehungen größere Abweichungen im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren.

Liegt zeitliche Konstanz der Raumluftströmung an der zu untersuchenden Stelle vor, z.B. in unmittelbarer Nähe der Zuluftdurchlässe bzw. allgemein in Bereichen, in denen die erzwungene Konvektionsströmung gegenüber der natürlichen Strömung dominiert, so lassen sich bei dem untersuchten Luftwechsel von $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$ absolute Meßgenauigkeiten in bezug auf das lokale Alter von $\pm 0,03 \tau_n$ (Step-up- und Step-down-Versuch) bzw. $\pm 0,10 \tau_n$ (Pulse-Versuch) erzielen.

Ist die Raumluftströmung an der betrachteten Stelle dagegen bezüglich der örtlichen, mittleren Geschwindigkeiten zeitlich instabil, sind mehrere zeitlich hintereinander ablaufende Messungen der Lüftungseffektivität erforderlich (wie im Bild 3 dargestellt), um zuverlässige Aussagen zu erhalten. Verhältnisse dieser Art können insbesondere bei der Quelllüftung auftreten.

Versuchseinrichtung

In einem bestehenden Klimaraum wurde ein Modellraum von 24 m^2 Grundfläche und $2,8 \text{ m}$ Höhe aufgebaut. Dieser Modellraum ist mit einem Quelllüftungs- und zwei Mischlüftungssystemen (2 Deckendrall- bzw. 20 Bodendrallauslässe) ausgestattet. Die Luftabsaugung erfolgt über vier Abluftleuchten, der Umluftanteil war bei den Untersuchungen gleich null. Bei konstantem Zuluftvolumenstrom wird der Abluftvolumenstrom über eine Drosselklappe so eingestellt, daß der Raum drucklos ist. Dies wird durch eine Rauchprobe in der einzig vorhandenen Öffnung des ansonsten „dichten“ Raumes überprüft. Eine Bestätigung für diesen Null-Abgleich der Volumenströme lieferten parallel durchgeführte Volumenstrom-Messungen über eine Blen-

denmeßstrecke nach DIN 1952, nach denen die Differenzen zwischen Zu- und Abluftkanal weniger als $3 \text{ m}^3/\text{h}$ bei $160 \text{ m}^3/\text{h}$ absolut betragen.

Sämtliche hier wiedergegebenen Messungen wurden bei einem Luftwechsel von $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$ und einer thermischen Raumlast von $\dot{q}'' = 8,5 \text{ W}/\text{m}^2$ durchgeführt. Die thermische Raumlast setzte sich zusammen aus 100 W Wärmestrahlung der Deckenleuchten und 100 W durch einen beheizten Personensimulator („Dummy“), der in Raummitte positioniert war. Der Modellraum ist mit 50 mm dicken Styroporplatten wärmegeädmt und kann als näherungsweise adiabatisch angenommen werden. Die Zulufttemperatur betrug bei allen Messungen $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Meßergebnisse

Im Bild 4 ist die horizontale und die vertikale Verteilung des lokalen Luftaustauschindex ε_p um einen in Raummitte sitzenden beheizten Dummy bei Einsatz der Quelllüftung zu sehen. Im „Nasenbereich“ des Dummy wird (erwartungsgemäß) die Luft etwa dreimal schneller ausgetauscht als im Abluftkanal. Diese sehr guten Luftaustauschverhältnisse bestehen aber nur in einem Radius von rund $0,15 \text{ m}$ um den Dummy. In dieser Höhe fällt ε_p in horizontaler Richtung räumlich symmetrisch sehr schnell auf einen konstanten Wert von rund $1,5$ bis $1,6$ ab.

Eine ebenfalls deutliche Abnahme von ε_p ergibt sich über der Raumhöhe. Die in Bild 4 eingetragenen vier Meßpunkte lassen sich mit den Ergebnissen anderer Autoren zu dem bekannten „S“-förmigen vertikalen Profil bei einer Quelllüftung ergänzen. Bemerkenswert ist aber, daß sich in einer Höhe von $1,7 \text{ m}$, d.h. oberhalb der sich bei einer Quelllüftung ausbildenden Trennschicht, und in einiger Entfernung vom Dummy etwas schlechtere Luftaustauschverhältnisse einstellen als bei einer idealen Mischlüftung mit $\varepsilon_p = 1$.

In weiteren Versuchen wurde die horizontale Verteilung des lokalen Luftaustauschindex um einen in Raummitte stehenden beheizten Dummy bei Einsatz der Quelllüftung, der beiden Deckendrallaus-

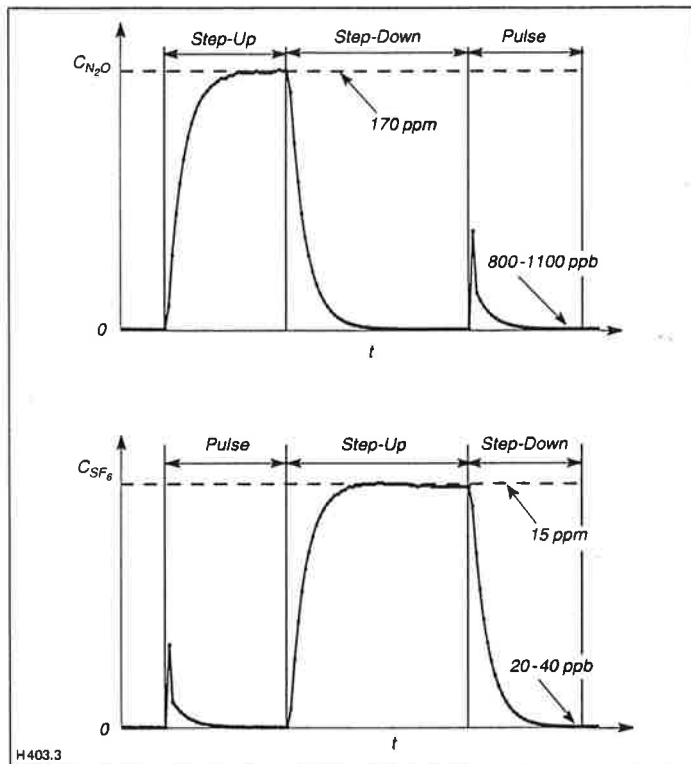


Bild 3: Beispielhafte Konzentrationsverläufe zur Bestimmung der Lüftungseffektivität

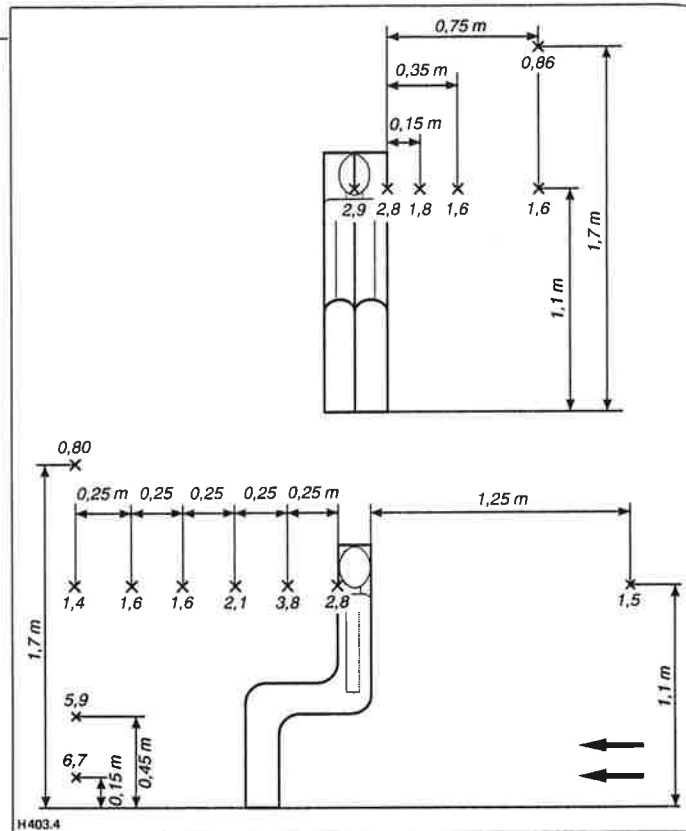


Bild 4: Lokaler Luftaustauschindex um einen sitzenden Dummy bei Einsatz der Quelllüftung

lässe (Mischlüftung von oben nach oben) und der 20 Bodendrallauslässe (Mischlüftung von unten nach oben) untersucht (siehe Bild 5).

Bei der Quelllüftung ergeben sich ähnliche horizontale Verteilungen von ϵ_p , wie bei dem sitzenden Dummy (siehe Bild 4). Zu beachten hierbei ist aber, daß sich insbesondere im „Nasenbereich“ des stehenden Dummy in 1,7 m Höhe ein ähnlicher Wert von ϵ_p ergibt, wie bei dem sitzenden Dummy in 1,1 m Höhe. Aber schon 0,25 m vom stehenden Dummy in 1,7 m Höhe entfernt bestehen wiederum Luftaustauschverhältnisse, die etwas schlechter sind als bei der idealen Mischlüftung. Bei der Quelllüftung liegen also sehr hohe Gradienten des lokalen Luftaustauschindex ϵ_p in horizontaler Richtung vor, und zwar sowohl in 1,1 m als auch in 1,7 m Höhe.

Bei den Deckendrallauslässen stellen sich an allen Orten im Raum fast Verhältnisse wie bei einer idealen Mischlüftung ein (ein geringer Anteil von Kurzschluß ist vorhanden). Selbst die thermische Grenzschicht um den Dummy herum (fiktiver „Nasenbereich“) wurde offenbar von der induzierten Raumluftströmung vollständig „zerstört“.

Die nahezu konstante Verteilung von ϵ_p in 1,1 m Höhe bei den Bodendrallauslässen deutet darauf hin, daß in dieser Höhe in erster Linie noch die von den Auslässen aufgeprägte Raumluftströmung den Luftaustausch bestimmt, was auch Rauchversuche bestätigten. Interessant ist aber die entspre-

chende Verteilung in 1,7 m Höhe: Unmittelbar am Dummy („Nasenposition“) sind der Luftaustausch und das örtliche Strömungsfeld (beobachtet durch Rauchversuche) Verhältnissen wie bei der Quelllüftung sehr ähnlich. In einer Entfernung von 0,25 m kommt aber wieder bzw. immer noch der Verdrängungseffekt der Strömung zum Tragen, der insbesondere dazu führt, daß an dieser Stelle etwas bessere Luftaustauschverhältnisse vorliegen als bei der Quelllüftung.

Interessiert man sich nun über die quantitative Beurteilung der lokalen Luftaustauschverhältnisse hinaus für die Effektivität des Luftaustausches im gesamten Raum, so läßt sich diese mit Hilfe des Luft-

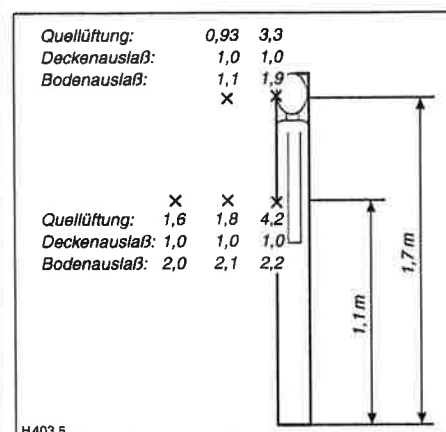


Bild 5: Lokaler Luftaustauschindex um einen stehenden Dummy bei Einsatz verschiedener Luftführungssysteme

austauschwirkungsgrades η_a beschreiben. Der Luftaustauschwirkungsgrad η_a stellt das Verhältnis des Durchschnittsalters der Raumluft bei idealer Verdrängungsströmung $\tau_n/2$ zum tatsächlichen Durchschnittsalter $\langle \bar{\tau} \rangle$ dar. Er sagt somit etwas über die Güte der Zulufverteilung im gesamten Raum aus.

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2 \langle \bar{\tau} \rangle} \quad (3)$$

Abhängig von der Luftführungsart können sich folgende Werte ergeben:

ideale Verdrängungsströmung: $\eta_a = 1,0$
 Quelllüftung: $0,5 < \eta_a < 1,0$
 ideale Mischlüftung: $\eta_a = 0,5$
 Kurzschlußströmung: $\eta_a < 0,5$.

Das Durchschnittsalter der Raumluft $\langle \bar{\tau} \rangle$ läßt sich durch eine Auswertung des Konzentrationsverlaufes im Abluftkanal bestimmen [8]. Bei der Untersuchung der Deckendrallauslässe ergab sich $\eta_a = 0,47$ (geringer Kurzschlußanteil), bei den beiden anderen Systemen ein Wert von jeweils $\eta_a = 0,65$.

Messungen zur Lüftungswirksamkeit und zur Lüftungseffektivität müssen nicht notwendigerweise gleichlautende bzw. sich entsprechende Ergebnisse liefern: Nach den oben behandelten Lüftungseffektivitätsuntersuchungen bewirken z.B. die Deckendrallauslässe im gesamten Raum einen Luftaustausch wie bei idealer Mischlüftung. Damit ist allerdings noch nicht die

Frage beantwortet, ob es bei diesem Luftführungssystem nicht trotzdem möglich ist, einen Raum in eine Raucher- und in eine Nichtraucherzone zu unterteilen. Nickel [9] ordnete z.B. in einem nach dem Mischlüftungsprinzip belüfteten Raum den Abluftkanal in einer Ecke des Raumes an. Bei der Untersuchung der Ausbreitung von Zigarettenrauch (CO-Konzentration als Indikator) stellte er fest, daß die durch das Absaugen der Luft erzeugte Sekundärströmung einen so großen Einfluß auf die gesamte Raumluftströmung hatte, daß eine Unterteilung des Raumes in eine Raucher- und in eine Nichtraucherzone möglich gewesen wäre. Abhängig von der zu beantwortenden Problemstellung ergänzen sich daher Messungen zur Lüftungseffektivität und zur Lüftungswirksamkeit.

Resümee

Voraussetzung für die Beurteilung von Raumluftströmungen mit Hilfe des lokalen Alters der Luft bzw. der Lüftungseffektivität ist eine gute Reproduzierbarkeit bei der meßtechnischen Bestimmung dieser Größen. Diese läßt sich nach den hier an unterschiedlichen Luftführungssystemen durchgeführten Untersuchungen erzielen. [H 403]

Literaturangaben

- [1] Grieves, P. W.: Measuring Ventilation Using Tracer-Gases. Brüel & Kjær, Nærum, Dänemark, 1989.
 [2] Raatschen, W.: Was ist Lüftungseffektivität? Klima-Kälte-Heizung 6 (1988), Nr. 5/6/7-8.
 [3] Roulet, C. A.: Field Comparison of Age of Air Measurement Techniques. Proceedings of Roomvent '92, Bd. 3, S. 213/30, Aalborg, Dänemark, 1992.

- [4] Jung, A.: Theoretischer Vergleich verschiedener Spurengasmeßverfahren zur Bestimmung der Effektivität von Lüftungssystemen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik, RWTH Aachen; veröffentlicht als Bericht 3/1/46/92 der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik FLT e.V., Frankfurt/Main, 1992.
 [5] Sandberg, M.: The Ventilation Effectiveness in Office Buildings and its Effects on Indoor Air Quality. ASHRAE Symposium on Indoor Air Quality and Energy Consumption, Montreal, Kanada, 1991.
 [6] Fitzer, K.: Bewertung des Luft- und Stoffaustausches in belüfteten Räumen. Klima-Kälte-Heizung 9 (1991), Nr. 1-2, S. 14/17.
 [7] Jung, A., Raatschen, W., Zeller, M.: An Improved Method to Determine the Age-of-Air from Tracer-Gas Measurements. Proceedings of Roomvent '92, Bd. 3, S. 231/44, Aalborg, Dänemark, 1992.
 [8] Sutcliffe, H.: A Guide to Air Exchange Efficiency. Air Infiltration and Ventilation Centre AIVC, Technical Note 28, Coventry, Großbritannien, 1990.
 [9] Nickel, J.: Air Quality in a Conference Room with Tobacco Smoking Ventilated with Mixed or Displacement Ventilation. Proceedings of Roomvent '90, Session D2 - 64, Oslo, Norwegen, 1990.

Einfluß der Kühlflächenanordnung auf die thermische Behaglichkeit

In einem Versuchsraum, der mit einer in zwei Hälften unterteilten nahezu geschlossenen Kühldecke ausgestattet ist, wurden Temperaturfelder in Abhängigkeit der Anordnung der Wärmequellen und der Kühldeckenflächen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, daß bei den hier untersuchten Lastfällen keine unbehaglichen Temperaturverteilungen auftreten, auch wenn nur eine Hälfte der Decke als Kühlfläche genutzt wird. Voraussetzung hierfür ist, daß der Hauptanteil der Kühllast durch die Kühldecke abgeführt wird und diese einen hohen Strahlungsanteil besitzt.

Dipl.-Ing. Martin Behne, Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, Technische Universität Berlin

Kühldecken sind als eine Alternative zu den herkömmlichen RL-Anlagen verstärkt im Gespräch, da hiermit einerseits dem hohen Komfortanspruch der Nutzer entsprochen werden kann und andererseits ein energetisch günstiger Betrieb möglich ist [1].

Die thermische Behaglichkeit von Personen wird von der Luftgeschwindigkeit, dem Turbulenzgrad und den Raumluft- und Oberflächentemperaturen bestimmt. Der Vorteil von Kühldecken in Hinblick auf diese Größen ist durch experimentelle Untersuchungen [2; 3] und Anwendungsfälle in der Praxis belegt worden. Diese positiven Erfahrungen beschränken sich jedoch auf Räume, bei denen die gesamte Deckenfläche gleichmäßig mit Kühlflächen ausge-

stattet war. Aus baulichen Gründen ist es aber nicht immer möglich, die gesamte Decke mit entsprechenden Rohrleitungen o.ä. zu versehen (z.B. wegen Unterzügen oder Luftkanälen). Andererseits liegt der Wunsch nahe, nur die Bereiche zu kühlen, in welchen hohe Kühllasten auftreten. Für solche Fälle gibt es bisher keine Erkenntnisse über die sich im Raum einstellenden Temperatur-, Geschwindigkeits- und Schadstoffkonzentrationsfelder.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer laufenden Untersuchung, die diese Wissenslücke schließen soll. Es wird

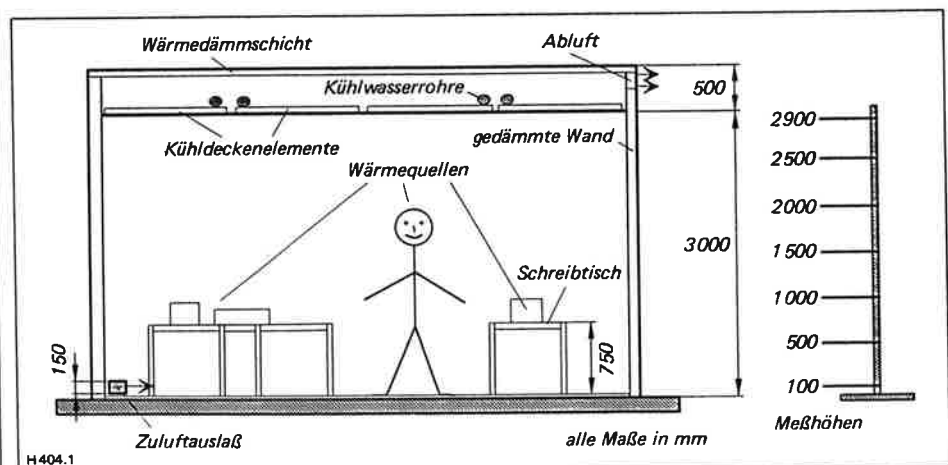


Bild 1: Querschnitt des Versuchsraumes mit Angabe der Meßhöhen