

Lüftungstechnik

# Eine alternative Methode zur Bestimmung der Lüftungseffektivität

Dirk Müller; Manfred Zeller,  
Aachen

Autoren



Dipl.-Ing. Dirk Müller, von 1989 - 1993 Studium an der RWTH Aachen, Vordiplom 1991. 1993 - 1994, Thayer School of Engineering, Dartmouth College Hanover/New Hampshire, USA, 1994 Bachelor of Engineering. 1995 Diplom an der RWTH Aachen. Ab 1995 Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik, RWTH Aachen. Ab 1999 Angestellter der Robert Bosch GmbH.



Prof. Dr.-Ing. Manfred Zeller, Jahrgang 1939, studierte an der RWTH Aachen Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Verfahrenstechnik. Danach war er zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter und später als Oberingenieur am dortigen Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik tätig und arbeitete auf dem Gebiet der Wärme- und Klimatechnik. Mit einem Thema aus diesem Bereich promovierte er auch. Seit 1982 ist er Professor an der RWTH Aachen und leitet die Abteilung Klimatechnik am vorgenannten Lehrstuhl.

Um die Wirkung von Luftführungssystemen, d.h. ihre Fähigkeit, den Aufenthaltsbereich von Personen mit aufbereiteter Luft zu versorgen und von Schadstoffen freizuhalten, beurteilen und quantifizieren zu können, sind verschiedene Bewertungskenngrößen eingeführt worden, so z.B. das Alter der Luft und der Kontaminationsgrad. Zu ihrer Bestimmung wird die Spurengastechnik eingesetzt. Die im folgenden beschriebene und näher untersuchte neue Methode, die das Verhalten von Temperaturschwankungen im Raum heranzieht, besitzt gegenüber den Spurengasverfahren eine Reihe von Vorteilen.

Lüftungssysteme sollen ein behagliches Klima im Aufenthaltsbereich von Personen schaffen und einen möglichst direkten Abtransport von Schadstoffen gewährleisten. Um diese Ziele mit geringem Energieaufwand und niedrigen Raumluftgeschwindigkeiten zu erreichen, haben sich neben dem Prinzip der Mischlüftung verschiedene Formen der sogenannten Quelllüftung etabliert. Die Idee bei dieser Luftführung ist, Zuluft und belastete Luft räumlich zu trennen, so dass die Qualität der Luft in der Aufenthaltszone deutlich über dem Abluftniveau liegt.

Durch geeignete Wahl der Lufteintrittsbedingungen kann eine thermische Luftschichtung bewirkt werden derart, dass sich im unteren Raumbereich eine Zuluftschicht ausbildet, aus der die vorhandenen Wärmequellen Luft ansaugen. Mit der entstehenden Auftriebsströmung werden auch die Schadstoffe transportiert. Schadstoffquellen sind sehr häufig mit Wärmeproduktion verbunden. Dies begünstigt die Schadstoffabfuhr. Zur Bestimmung der Effektivität dieser Lüftungsmethoden werden nun Verfahren benötigt, die eine Aussage über die lokale und globale Luft- bzw. Schadstoffverteilung im Raum erlauben.

## Spurengasmethode zur Bestimmung des relativen Alters der Luft

Zur Ermittlung der Schadstoffverteilungen dient im allgemeinen die Spurengastechnik, meist nach der sog. Step-up oder Step-down Methode. Dabei wird

der Zuluft zum Zeitpunkt  $t_0$  ein konstanter Spurengasstrom beigemischt oder einem Raum mit einheitlicher Spurengaskonzentration ein reiner Zuluftstrom zugeführt. Aus dem an verschiedenen Orten des Raumes gemessenen Spurengaskonzentrationsverlauf lässt sich dann das relative lokale Alter der Luft  $\tau_p^*$  bestimmen. Diese Kennzahl beschreibt die mittlere lokale Ankunftszeit der Zuluft und entspricht unter der Voraussetzung, dass der Schadstoff im Raum gleichmäßig emittiert wird, dem lokalen Kontaminationsgrad  $\bar{\mu}_p^*$  der Luft, charakterisiert somit also gleichzeitig die Schadstoffverteilung.

Wie man aus der Auswertungsgleichung für  $\tau_p^*$

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p}{\tau_e} = \frac{\int_{t_0}^{\infty} c_p^*(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} c_e^*(t) dt} \quad (1)$$

ersieht, gehen in diese die normierten Spurengaskonzentrationsmesswerte  $c^*(t)$  am Ort p und in der Abluft e ein [1]. Für diese Normierung benötigt man den oberen bzw. unteren Grenzwert des Versuches. Zwei Schwierigkeiten treten dabei auf. Da die Messzeit endlich ist, müssen die Endwerte der Messung durch Extrapolation gewonnen werden. Außerdem benötigen gewöhnliche Gasanalysatoren eine relativ lange Analysezeit. Deshalb wird der Verlauf der Messwerte für  $t \rightarrow \infty$  mit einem Exponentialansatz beschrieben, wobei der zu erwartende

[Erfolg mit Luft und Leistung]

RIS RIEBERTAUM

WER RICHTIG LUFT HAT, VERBRENNT WENIGER GAS.



**ebm**   
MOTOREN VENTILATOREN

Optimierte Lösungen für alle Lüftungsanwendungen finden Sie bei uns. Zum Beispiel in der Gastechnik: Die ebm EC-SYSTEMS-Gasgebläse sind kompakt gebaut, wartungsfrei und glänzen mit überdurchschnittlicher Lebensdauer. Dank ihrer leichten und präzisen Regelbarkeit tragen sie dazu bei, den  $\text{NO}_2$ -Ausstoß zu reduzieren. Drehzahlen über 3500 1/min sind problemlos zu realisieren. Das breit nutzbare Drehzahlband ermöglicht es, die Heizleistung der Endgeräte über einen großen Bereich zu regeln. Mit EC-SYSTEMS-Gasgebläsen kann die Gemischbildung aus Gas und Frischluft auch innerhalb des Gebläses erfolgen. Sie bieten Schnittstellen zu allen Steuerungen und Regelungsaufgaben in der Gastechnik und sind natürlich EMV-konform. Die Kombination aus all diesen Eigenschaften hat uns zum Weltmarktführer bei Problemlösungen für „Luft und Leistung“ gemacht.

ebm Werke GmbH & Co., Postfach 11 61, 74671 Muldingen, <http://www.ebm-werke.de>

Fehler der Extrapolation stark von der Genauigkeit der letzten Messpunkte abhängt. Für die Bestimmung des lokalen Alters der Luft ist aus diesem Grunde an jedem Messpunkt eine Mindestdatenrate erforderlich. Bei Verwendung eines Gasanalysators beschränkt dies die Anzahl der Messpunkte.

**Alternative Messmethode**

Anstatt eines Spurengases können Lufttemperaturschwankungen als Tracer für die Luftbewegung im Raum herangezogen werden. Bevor die Methode näher erläutert wird, werden zunächst die Spurengaskonzentration und die Lufttemperatur hinsichtlich ihrer Tracereigenschaften untersucht. Als Spurengas wird von den meisten Autoren SF<sub>6</sub> verwendet, da es von den üblicherweise eingesetzten Baumaterialien nicht oder nur unmerklich ad- bzw. absorbiert wird. Der diffusive Transport ist dabei gegenüber dem konvektiven Transport vernachlässigbar klein, wie Abschätzungen und Messungen gezeigt haben. Die Spurengaskonzentrationsverteilung spiegelt daher die Luftbewegung wider. Für die Benutzung der Temperatur als Tracer gilt es somit nachzuweisen, dass sich Wärme hinsichtlich der Transportmechanismen in Raumluftströmungen wie Spurengase verhält.

Das Verhältnis des diffusiven Stoff- und Wärmetransports wird durch die Lewis-Zahl gekennzeichnet:

$$Le = \frac{D_{SF_6, Luft}}{a_{Luft}} \quad (2)$$

Hierin bedeuten D der Diffusionskoeffizient und a die Temperaturleitfähigkeit. Für diese Kennzahl ergibt sich mit dem Diffusionskoeffizienten von SF<sub>6</sub> in Luft nach Chapman und Enskog

$$D_{SF_6, Luft} = \left[ \frac{\xi_{N_2}}{D_{SF_6, N_2}} + \frac{\xi_{O_2}}{D_{SF_6, O_2}} \right]^{-1} = 9,4 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} ; \xi_i = \text{Massenanteil} \quad (3)$$

ein Wert von 0,45. Das bedeutet, dass der diffusive Wärmetransport ungefähr doppelt so groß wie der diffusive Stofftransport ist. Die Temperatur ist somit weniger gut als Tracer für konvektive Luftbewegungen geeignet. Maßgebend für die Einsetzbarkeit des Tracers ist jedoch die Péclet-Zahl, welche den konvektiven mit dem diffusiven Transport vergleicht.

$$Pe = \frac{u_{min} L}{a_{Luft}} \quad (4)$$

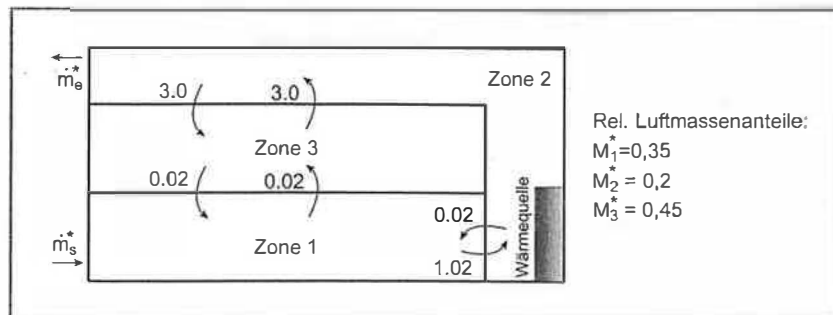


Bild 1

**Zonenmodell für Testrechnungen**

Zur Abschätzung dieser Kennzahl in Raumluftströmungen wird als unterer Geschwindigkeitswert  $u_{min} = 1 \text{ cm/s}$  und als minimaler Transportweg für einen Schadstoff in den Aufenthaltsbereich  $L = 10 \text{ cm}$  gewählt. Damit ergibt sich  $Pe_{Wärme} \approx 50$ . Obwohl diese Péclet-Zahl deutlich kleiner ist als die für den Stofftransport ( $Pe_{SF_6} \approx 100$ ), ist sie deutlich größer als eins, d.h. der konvektive Transport dominiert. Die Temperatur der Luft kann somit bei vernachlässigbarem Genauigkeitsverlust als Tracer für Raumluftströmungen verwendet werden. In Stagnationsgebieten spielt die Diffusion natürlich eine Rolle. Dort wird sie die Ergebnisse verfälschen, jedoch sind diese Gebiete trotzdem erkenn- bzw. detektierbar. Als weitere Forderung müssen die Temperaturschwankungen im Fluid so klein sein, dass keine Beeinflussung der Strömung durch Auftriebskräfte eintritt.

Wollte man das Spurengasverfahren einfach formal auf die Temperatur als Tracer übertragen, so müsste man die Zulufttemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt um einen festen Betrag  $\Delta\theta$  anheben und während der gesamten Messzeit konstant halten. Die Zulufttemperaturerhöhung könnte über ein Heizgitter erfolgen. In der Regel ändern sich jedoch bei Lüftungsanlagen die Zulufttemperaturen zeitlich, und die Wir-

ändert sich das Strömungsfeld im Raum infolge der thermischen Kräfte.

Statt eines Temperatursprungs wird deshalb der Zuluft eine Temperaturschwingung niedriger Frequenz aufgeprägt, welche entweder durch die vorgegebene Schalthysterese der Luftkonditionierung oder durch ein periodisch beheiztes Gitter im Zuluftkanal erzeugt werden kann. Die resultierende Raumlufttemperaturschwingung lässt sich in einfacher Weise mit Thermoelementen an verschiedenen Punkten im Raum gleichzeitig messen und aufzeichnen. Bei geeigneter Wahl der Frequenz kann man dann aus dem Phasenversatz der Temperaturschwingungen an den verschiedenen Orten das relative Alter der Luft bestimmen. Wie der lokale Konzentrationsanstieg des Tracergases wird auch die Temperaturschwingung konvektiv durch den Raum transportiert, ihre Phasenverschiebung stellt daher ein Maß für die mittlere Ankunftszeit der Zuluft an dem betrachteten Punkt dar.

**Testrechnungen**

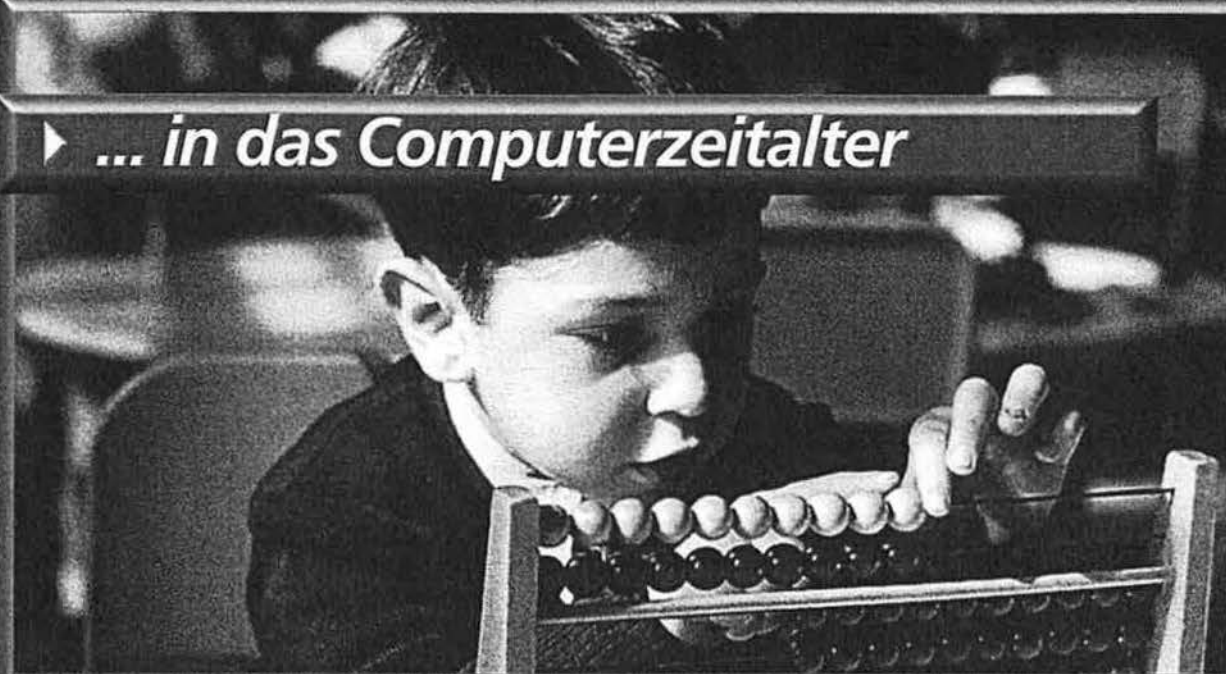
*Einfluss der Schwingungsfrequenz*

kungen der aufgezwungenen und der unkontrolliert auftretenden Zulufttemperaturschwankungen auf die Raumlufttemperatur lassen sich nur schwer voneinander trennen. Die Auswertung eines solchen Versuches ist daher praktisch nicht möglich. Ein weiteres Problem resultiert daraus, dass bei kleinem Temperatursprung die Raumlufttemperatur an Orten mit hohem Alter der Luft sehr langsam ansteigt, so dass ihr Verlauf nur ungenau gemessen werden kann. Wählt man hingegen einen großen Temperatursprung in der Zuluft, so

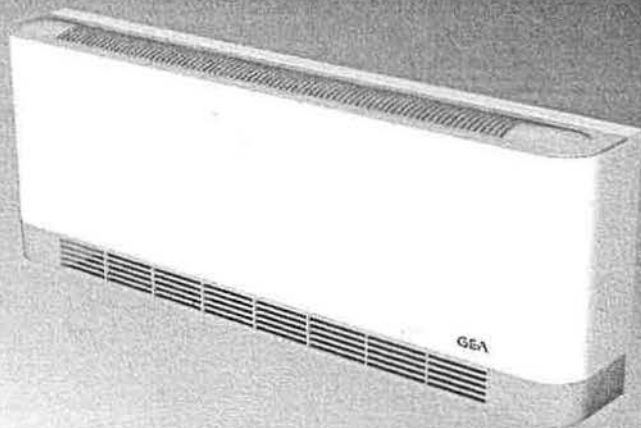
Die Funktionsweise des vorgeschlagenen Verfahrens wird zunächst anhand eines einfachen Drei - Zonen Modells überprüft. Bild 1 zeigt den dazu betrachteten Modellraum, der mit einer Quelllüftung ausgestattet ist. Die Luft wird in Zone 1 impulsarm zugeführt. Sie erwärmt sich anschließend in der Zone 2, induziert dabei einen Volumenstrom aus Zone 1 und vermischt sich gut mit einem Austauschluftstrom aus der Rezirkulationszone 3. Die Luft verlässt den Raum aus der Zone 2, in der somit Abluftzustand herrscht.

▶ *Der erste Schritt ...*

▶ *... in das Computerzeitalter*



▶ *... zur Behaglichkeit*



**GEA** GEA Happel  
Klimatechnik

GEA Happel Klimatechnik GmbH  
Südstraße 48 • D-44625 Herne  
Telefon (0 23 25) 4 68-00 • Telefax (0 23 25) 4 68-222  
[www.gea-happel.de](http://www.gea-happel.de)

Beim neuen Basic-Geko überzeugen neben Preis und Leistung auch die einfache Regelung und Installation. Als Standardlösung bietet er in bewährter GEA-Qualität ab sofort den Einstieg in behagliches Klima für alle!

Systemlösungen für Komfortklimatisierung made by GEA

Die Energiebilanzen für die einzelnen Zonen führen zu einem System von gewöhnlichen Differentialgleichungen der Form

$$M_i^* \frac{d\vartheta_i}{dt^*} = \underbrace{\dot{m}_s^* \vartheta_s}_{\text{Zuluft}} - \underbrace{\dot{m}_e^* \vartheta_e}_{\text{Abluft}} + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^3 \dot{m}_{ji}^* \vartheta_j}_{\text{Energietransport in eine Zone}} - \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^3 \dot{m}_{ij}^* \vartheta_i}_{\text{Energietransport aus einer Zone}}$$

$$M_i^* = \frac{M_{\text{Zone } i}}{M_{\text{Raum}}}; \dot{m}_e^* = \frac{\dot{m}_e \tau_n}{M_{\text{Raum}}}; \dot{m}_{ji}^* = \frac{\dot{m}_{ij} \tau_n}{M_{\text{Raum}}}; \tau_n = \frac{M_{\text{Raum}}}{\dot{m}_s}; t^* = \frac{t}{\tau_n} \quad (5)$$

das abhängig von der Art der Eingangsfunktionen analytisch oder numerisch integriert werden kann. Dabei ist unterstellt, dass die spezifischen Wärmekapazitäten der Luft näherungsweise konstant sind. Außerdem kann man die Wärmequelle in Zone 2 außer acht lassen. Sie ist für die hier angestellte Betrachtung irrelevant, da sie lediglich eine Verschiebung des Niveaus des Temperaturverlaufes bewirkt. Ihre wesentliche Funktion besteht darin, dass sie die Austauschluftströme erzeugt. Durch die vorgenommene Normierung der Variablen sind die Berechnungsergebnisse unabhängig vom Luftwechsel.

Das relative Alter der Luft in den Zonen 1 und 3 wird nun zum einen für einen fiktiven Step-up Versuch berechnet. Es ergeben sich dabei die Zahlenwerte  $\tau_1^* = 0,378$  und  $\tau_3^* = 1,15$ . Zum anderen wird anstatt eines sprungförmigen ein sinusförmiger Zulufttemperaturverlauf vorgegeben und aus der Lösung des

Gleichungssystems für den eingeschwungenen Zustand die Amplitude  $A_i$  der Schwingung und deren Phasenlage

$t_{v,i}$  für jede Zone ermittelt. Das relative Alter der Luft lässt sich dann aus dem normierten Phasenversatz  $\Delta t_{v,i}$  in jeder Zone wie folgt berechnen.

$$\tau_i^* = \frac{\Delta t_{v,i}}{\Delta t_{v,e}} = \frac{t_{v,i} - t_{v,s}}{t_{v,e} - t_{v,s}} \quad (6)$$

Die Berechnungen ergeben eine gute Übereinstimmung der Zahlenwerte für das relative Alter der Luft für kleine Frequenzen, siehe **Bild 2**. Mit steigender Frequenz wächst der Fehler jedoch schnell an, weil sich die Temperaturschwankungen in den einzelnen Zonen überlagern und dadurch die Information über die Strömungsstruktur verloren geht. Die Schwingungsamplitude wird bei höheren Frequenzen durch die Massenträgheit der Zonen sowie die Überlagerung von Schwingungen unterschiedlicher Phase stark gedämpft.

Die normierte Schwingungsfrequenz sollte somit unterhalb eines Wertes von 0,1 liegen, d.h. die Periodendauer muss der zehnfachen Zeitkonstanten  $\tau_n$  entsprechen. Ein Luftwechsel von  $n = 5$  1/h erfordert danach eine Periodendauer von 2 Stunden. In Wirklichkeit ist die Begrenzung der normierten Frequenz  $\tau_n \omega$  schwächer, da bei einer realen Quellluftströmung mehr als 3 Zonen vorhanden

sind, und nicht alle Zonen im direkten Austausch miteinander stehen. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich Schwingungen aus unterschiedlichen Zonen überlagern, ist daher geringer als in dieser Modellrechnung.

**Wandeffluss**

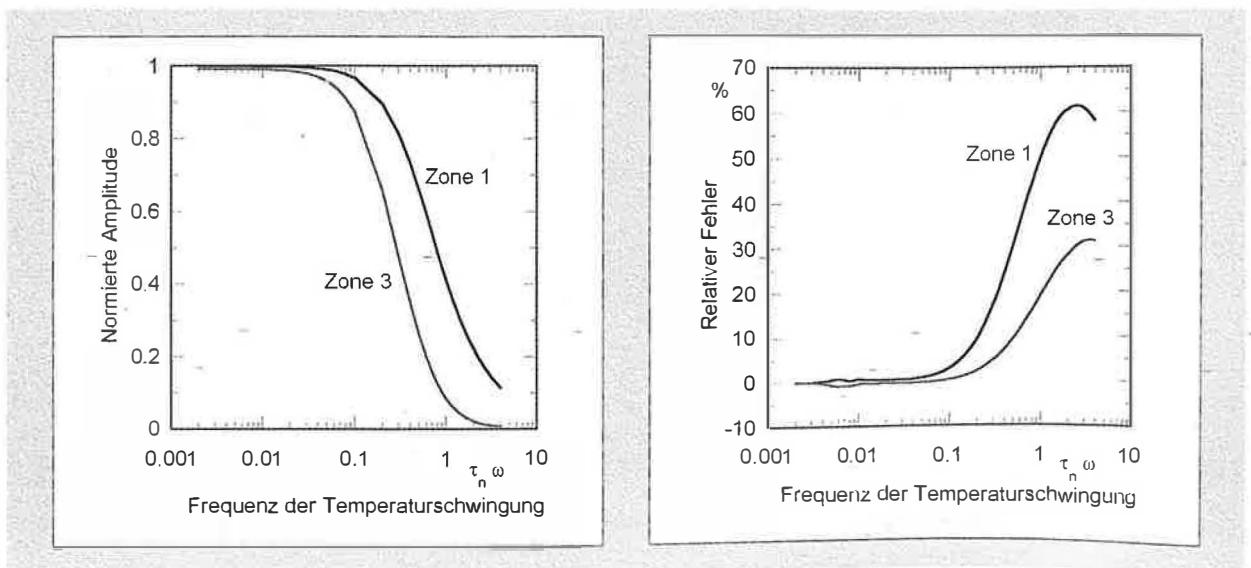
Die Wände und die Raumluft tauschen je nach Temperaturdifferenz und Strömungszustand Wärme aus, was ebenfalls zu einer Verfälschung des Verfahrens führen kann. Um diesen Effekt zu untersuchen, wird eine adiabate Wand betrachtet. Den größten Einfluss hat die Wand bei einer schweren Bauweise. Im Grenzfall werden dann die Temperaturschwankungen nicht an die Wand übergeben, sondern die Wand hält die mittlere Lufttemperatur  $\vartheta_m$ . Steigt die Lufttemperatur an der Wand an, so nimmt gleichzeitig der Wärmestrom in die Wand zu. Das Temperaturmaximum in einem Kontrollvolumen an der Wand wird erreicht, wenn die Energiezufuhr durch die einströmende Luftmasse gerade die Wärmeabfuhr durch den Wandwärmestrom deckt.

Aus der Energiebilanz an einem kleinen kubischen Kontrollvolumen der Kantenlänge  $\Delta L$  im Wandbereich (**Bild 3**) ergibt sich folgende Differentialgleichung für die Lufttemperatur  $\vartheta$ .

$$\frac{d\vartheta}{dt} + n(1+N)\vartheta = n \cdot \Delta\vartheta \cdot \cos(\omega t) \quad \text{mit} \\ \vartheta = \vartheta - \vartheta_m; n = \frac{\dot{m}}{m}; N = \frac{\alpha \cdot \Delta L^2}{m c_p} \quad (7)$$

**Bild 2**

**Amplitudenverhältnis und relativer Fehler im Alter der Luft in Abhängigkeit von der Schwingungsfrequenz**



Diese Differentialgleichung kann analytisch gelöst werden. Da es wiederum genügt, den eingeschwungenen Zustand des Systems zu betrachten, muss nur die partikuläre Lösung  $\Theta_p$  der Differentialgleichung gefunden werden. Sie lautet

$$\Theta_p = \Delta\vartheta \cdot \frac{\frac{n}{\omega}}{\sqrt{1 + \left[ (1+N) \cdot \frac{n}{\omega} \right]^2}} \cdot \sin \left[ \omega t + \arctan \left( \frac{n}{\omega} (1+N) \right) \right] \quad (8)$$

Der sich einstellende Phasenversatz  $t_v$

$$t_v = \frac{1}{\omega} \cdot \arctan \frac{n}{\omega} \cdot (1+N) \quad (9)$$

besteht aus zwei unterschiedlichen Anteilen,  $n/\omega$  und  $(1+N)$ . Der Term  $n/\omega$  erfasst den Einfluss des lokalen Luftwechsels und der Term  $(1+N)$  die Auswirkung des Wärmeaustausches mit der Wand. Da das relative Alter der Luft nur vom lokalen Luftwechsel abhängt, gilt als Bedingung für vernachlässigbaren Störungseinfluss der Wand:

$$N \ll 1 \Leftrightarrow \frac{\alpha \cdot \Delta L^2}{\dot{m} \cdot c_p} \ll 1 \quad (10)$$

Mit  $\dot{m} = \rho \cdot \Delta L^2 \cdot v$  folgt daraus

$$\frac{\alpha}{\rho \cdot c_p \cdot v} \ll 1 \quad (11).$$

Setzt man typische Werte ein ( $\alpha = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1 \text{ kJ/kgK}$ ,  $v = 1 \text{ cm/s}$ ), so ergibt sich für diesen Ausdruck ein Wert von 0,2. Das Messverfahren kann somit auch noch in Wandnähe ohne wesentliche Verfälschung eingesetzt werden. Bei sehr kleinem lokalem Luftwechsel ist jedoch Vorsicht geboten.

### Messungen in einem Versuchsraum

Die neue Messmethode wurde in einem Versuchsraum getestet. Der Klimaraum entspricht einem üblichen Büroraum mit den Maßen  $6 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$  und ist mit einer Quelllüftung ausgestattet. In der linken Raumhälfte befindet sich ein Schreibtisch mit einem Computermodell und einer sitzenden und einer stehenden Person an den Tischen. Die zwei Personen und der Computer geben einen Wärmestrom von 400 Watt ab.

Die Temperaturschwingungen wurden mit der Hystereseschaltung für die Kältemaschine in Verbindung mit einem Kaltwasservorratsbehälter realisiert. Leider konnten mit der verwendeten Anlage keine beliebigen Parameter eingestellt werden, da Schwingungsdauer

Bild 3

### Wandelement

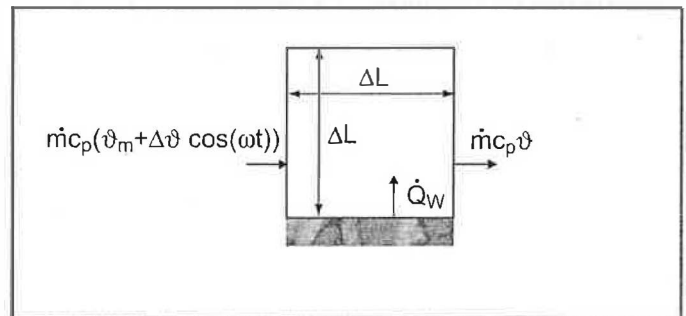
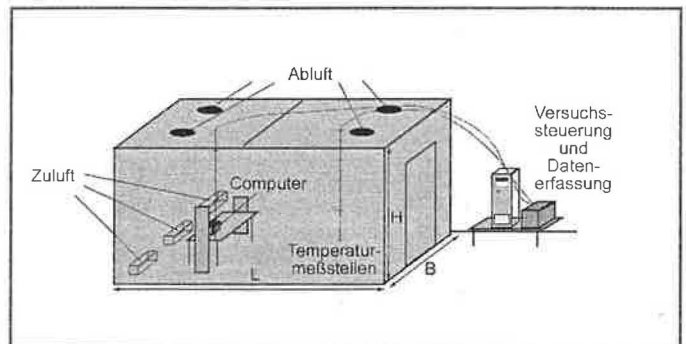


Bild 4

### Versuchsraum mit Messaufbau



und Amplitude durch die Anlagencharakteristik gekoppelt sind. Im Versuchsraum wurden die Lufttemperaturverläufe jeweils an zwölf Messstellen in unterschiedlicher Raumhöhe in der rechten und linken Raumhälfte (Bild 4) sowie im Zu- und Abluftsystem gemessen und aufgezeichnet.

Bild 5 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe an einigen Punkten im Versuchsraum. Die Amplitude der Schwankungen nimmt mit zunehmender Raumhöhe rasch ab und erreicht ihr Minimum im oberen Raumbereich, aus dem die Luft den Raum verlässt (Abluftzustand).

Obwohl in diesem Fall die Amplitude der Zulufttemperaturschwingung ein Kelvin beträgt, sind bei Zugabe von Nebel zur Sichtbarmachung der Strömung keine Auftriebseffekte beobachtet worden. Die Temperatur ändert sich nur langsam, so dass die über der Raumhöhe auftretenden und für den Auftrieb maßgebenden Temperaturdifferenzen deutlich unterhalb eines Kelvins liegen.

Zur Bestimmung des Phasenversatzes im Punkt  $i$  wird der Temperaturmittelwert von allen Schwingungen subtrahiert und anschließend eine Kreuzkorrelation sämtlicher Werte mit dem Zulufttemperaturverlauf berechnet.

$$\Phi_{i,s}(\zeta) = \int_0^{t_{\text{Messung}}} \vartheta_i(t) \vartheta_s(t + \zeta) dt \quad (12)$$

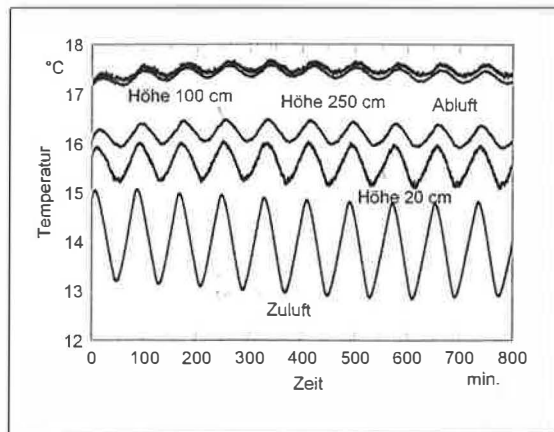
Der Phasenversatz  $t_v$  ergibt sich durch die Division der Versatzzeiten  $\zeta_i$  für die Maxima der Kreuzkorrelationsfunktionen.

$$\tau_i^* = \frac{\Delta t_{v,i}}{\Delta t_{v,e}} = \frac{t_{v,i} - t_{v,s}}{t_{v,e} - t_{v,s}} = \frac{\zeta_{\text{max},i}}{\zeta_{\text{max,e}}} \quad (13)$$

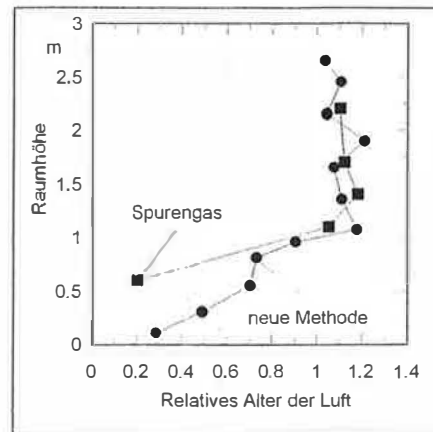
Im Beispiel von Bild 5 beträgt der Luftwechsel  $n = 5 \text{ h}^{-1}$  und damit die normierte Frequenz der Temperaturschwingung  $\tau_n \omega = 0,13$ . Es ist daher nur ein geringer prinzipieller Fehler zu erwarten.

### Vergleich von Spurengas- und Temperaturversatzmessungen

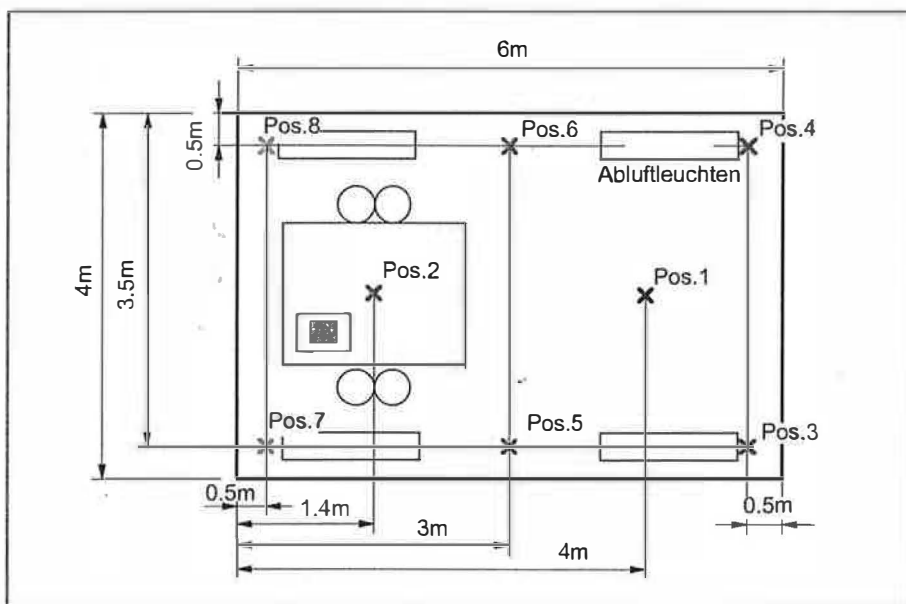
Zur Validierung der neuen Messmethode sind in Bild 6 Ergebnisse von Spurengas- und Temperaturversatzmessungen bei einem Luftwechsel von  $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$  dargestellt. Die verwendeten Spurengasmessungen entstammen der Arbeit von Jung [1]. Gezeigt ist das Höhenprofil in der Mitte der rechten Raumhälfte. In ca. 1 m Höhe befindet sich die eingangs beschriebene Trennschicht von Zuluft und vermischter Raumluft. Die Spurengasmessungen und die Messungen nach dem neuen Verfahren stimmen im Rahmen der systembedingten Genauigkeiten gut überein. Die Abweichung zwischen den beiden Messungen resultiert u.a. aus den genannten Fehlerquellen der neuen Messmethode, sie folgen jedoch auch aus den nicht identisch einstellbaren Randbedingungen, da die Versuche nicht zeitgleich durchgeführt werden konnten.



**Bild 5**  
Temperaturverläufe im Versuchsraum,  
Luftwechsel  $n = 5 \text{ h}^{-1}$ ,  $\tau_n \omega = 0,13$



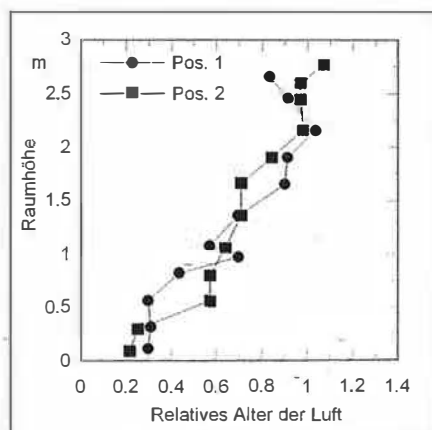
**Bild 6**  
Relatives Alter der Luft bei einem Quell-  
luftsystem mit einem Luftwechsel von  
 $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$



**Bild 7**  
Aufsicht Versuchsraum mit Messpositionen

**Feldmessung im Versuchsraum**

Da mit der neuen Messmethode sehr leicht deutlich mehr Messpunkte als bei der Spurengasmethode erfasst werden können, sind Feldmessungen des lokalen Alters der Luft mit geringem Aufwand möglich. Beispielhaft wurde das lokale Alter der Luft an 96 Stellen im Versuchsraum bei einem Luftwechsel von  $n = 5 \text{ h}^{-1}$  gemessen. Bild 7 zeigt die Anordnung der Messpositionen in einer Aufsicht auf den Versuchsraum. An jeder Position befinden sich 12 Messpositionen in unterschiedlicher Raumhöhe. In Bild 8 sind die Ergebnisse der Mess-



**Bild 8**  
Relatives Alter der Luft an den Messposi-  
tionen 1 und 2

positionen 1 und 2 über der Raumhöhe gezeigt. Die Zuluft breitet sich bis zu einer Höhe von ca. 0,25 m direkt von den Zuluftöffnungen (linke Wand, Bild 7) im Raum aus. In diesem Bereich sind an beiden Messpositionen geringe Alter der Luft zu beobachten. Position 2 befindet sich näher am Zuluftsystem und weist deshalb ein etwas niedrigeres Alter auf.

Nachdem die Zuluft die rechte Raumbegrenzung erreicht hat, steigt sie an der Wand empor und durchströmt anschließend den Raum in entgegengesetzter Richtung bis zu einer Höhe von ca. 1 m. Jetzt erreicht die Luft zuerst Position 1, die nun gegenüber Position 2 ein geringeres Alter der Luft besitzt. Ein ähnliches Verhalten ist auch an den Messpositionen 3 bis 8 in Bild 9 zu erkennen. Zusätzlich zeigt sich an einigen Positionen ein starker Anstieg des lokalen Alters im Bereich der Trennschicht von Zu- und Rückströmluft und der von den Wärmequellen in den oberen Raumbereich transportierten Luft (Raumhöhe ca. 1 m). Die Trennschicht zeichnet sich durch sehr geringe Luftbewegungen aus, was durch Zugabe von Theaternebel bestätigt werden konnte.

Das höchste lokale Alter der Luft stellt sich im oberen Raumbereich an den Positionen 6 und 8 ein. Insgesamt ergibt sich im Vergleich zu der Messung bei einem Luftwechsel  $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$ , siehe Bild 6, eine weniger ausgeprägte Schichtung, da die thermische Last bei Änderung des Luftwechsels nicht erhöht wurde.

**Zusammenfassung**

Das dargestellte Verfahren, das Temperaturschwankungen zur Ermittlung der Lüftungseffektivität von Luftführun-

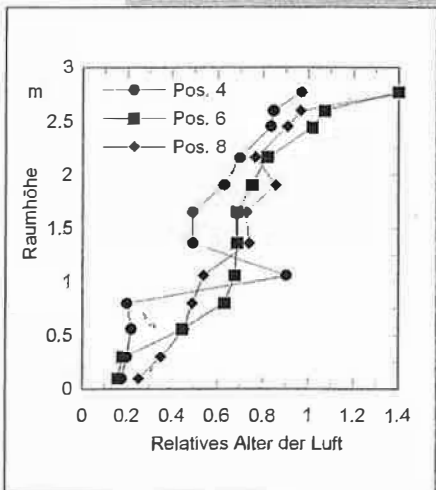
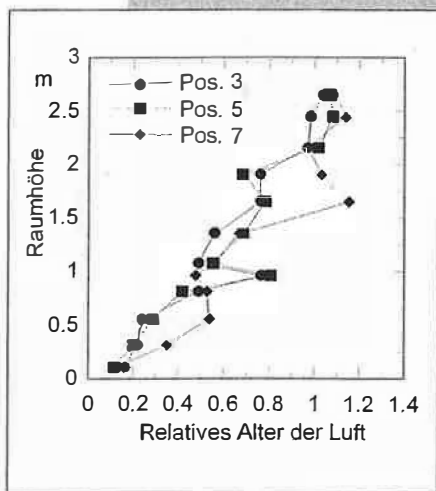


Bild 9

Relatives Alter der Luft an den Messposition 3 bis 8

gen benutzt, hat gegenüber der Spurengasmethode wesentliche Vorteile. Im Vergleich zu dieser, die mit einer aufwendigen Gasanalysetechnik durchgeführt werden muss, benötigt es nur zeitlich aufgelöste Temperaturverläufe, die mit herkömmlichen Thermoelementen und einem Multiplexer aufgezeichnet werden können. Die Kosten dieses Verfahrens sind daher ganz erheblich geringer. Durch die höhere Anzahl an Messstellen werden Feldmessungen für das lokale Alter der Luft möglich. An beliebig vielen Orten im Raum kann gleichzeitig gemessen werden, da keine Mindestanalysezeit für jeden Messpunkt wie bei den sequentiell arbeitenden Gasanalytoren erforderlich ist.

Das neue Verfahren liefert im Gegensatz zur Spurengasmesstechnik keine direkte Aussage zur Schadstoffausbreitung von lokalen Schadstoffquellen, allerdings kann durch die hohe örtliche Auflösung der Messungen des Alters der Luft indirekt auf die Ausbreitung lokaler Quellen geschlossen werden. H 151

## Literatur

[1] Jung, A.: Bewertung von Raumluftströmungen mit der Spurengasmesstechnik, DKV – Forschungsbericht Nr. 58 (1998).

Software **CATS**

# SymCAD 2000...

das Synonym für CAD in der Haustechnik



**kostenlose Demo!**

**kompatibel**  
als AutoCAD-Applikation auf einem Standard basierend

**interaktiv**  
planen, konstruieren, berechnen, ausschreiben

**innovativ**  
Objektklassen nach IFC, MFC

**IAI**  
**komplett**

Heizung, Lüftung, Sanitär, Sprinkler, Rohrleitungsbau, Elektro

**intuitiv**  
anwenderfreundliche Oberfläche im Windows Style

**3D**

[www.cats-software.com](http://www.cats-software.com)

C.A.T.S. Software GmbH, Platz der Deutschen Einheit 25, 64293 Darmstadt,  
Tel: 06151/82 94 0, Fax: 82 94 16, e-mail: cats@cats-software.com

C.A.T.S. Medert, West, Technologiengeländ Mittelner Landweg 90, 48161 Münster,  
Tel: 02534/800 165, Fax: 800 162, e-mail: cats-west@cats-software.com

C.A.T.S. Meierkassau Südwest, Feldböcker Weg 55, 55457 Gensingen,  
Tel: 06727/95 28 50, Fax: 95 28 51, e-mail: cats-suedwest@cats-software.com

C.A.T.S. Heiterlassung Süd, Thier-Pinsel-Weg 11, 80797 München,  
Tel: 089/3408992-0, Fax: 3408992-2, e-mail: cats-sued@cats-software.com

Delta BAH III Systemhaus GmbH, Ludwig-Lüchters-Str. 2, 09212 Limbach,  
Tel: 03722/71 70 0, Fax: 71 70 51, e-mail: schlimpert@delta.de

Wemex data GmbH, Wichterstraße 18/17, 10439 Berlin,  
Tel: 030/44 66 22 50, Fax: 04 66 22 29, e-mail: info@wemexdata.de

Wemex data Niederlassung Braunschweig, Sothmannstraße 60, 14478 Potsdam,  
Tel: 0331/81 22 39, Fax: 81 22 51, e-mail: info@wemexdata.de

GT-Plan Consulting GmbH, Berlin-Mitte 91, 20457 Hamburg,  
Tel: 040/36 96 810, Fax: 075 100 55, e-mail: info@gt-plan.de

EDC Engineering data Consult, Karl-Weichert-Allee 76, 30625 Hannover,  
Tel: 0511/541 54 41, Fax: 541 54 43, e-mail: info@edc-consult.de

IGA Service, Schwanen-Baumstraße 9, 76275 Ettlingen-Schöllbrunn,  
Tel: 07243/52 10 0, Fax: 52 10 06, e-mail: info@iga-service.de

Erich Bäumler, Dr. Karl-Hanser Straße 28, A-4061 Pasching,  
Tel: 0043/664 355 1960, Fax: 722 966 4854, e-mail: cats.austria@t-online.at