

Andreas Jung  
Manfred Zeller

# Modifizierte Puls- methode zur Bestimmung der Lüftungseffektivität

**Die hier vorgeschlagene Abwandlung der Pulsmethode zur Bestimmung der Lüftungseffektivität von Zuluftdurchlässen besteht in der Verwendung einer endlichen Dosierdauer  $\Delta t_p$ . Die Auswerteprozedur muß allerdings entsprechend angepaßt werden.**

**Mit dieser Vorgehensweise werden die typischen Probleme, die bei der Anwendung der konventionellen Pulsmethode auftreten, vermieden.**

**Experimentelle Vergleichsuntersuchungen lieferten reproduzierbare Ergebnisse, die mit denen der beiden anderen Standardverfahren (Step-up- oder Step-down-Methode) übereinstimmen. Vorteil der modifizierten Pulsmethode ist, daß die Meßzeiten kleiner sind.**

**Damit stellt sie eine wertvolle Ergänzung der derzeit vorrangig eingesetzten Step-up- und Step-down-Methoden dar.**

Eine wesentliche an Luftführungssysteme gestellte Anforderung ist, thermisch behagliche Bedingungen für die sich im Raum aufhaltenden Personen zu schaffen. Dazu gehört auch, daß sie den Aufenthaltsbereich von Personen ausreichend mit Frischluft versorgen (Lüftungseffektivität) und im Raum freigesetzte Schadstoffe oder Wärme nicht in den Aufenthaltsbereich gelangen lassen bzw. aus diesem entfernen (Lüftungswirksamkeit). Mit der Spurengasmeßtechnik ist man in der Lage, unterschiedliche Luftführungssysteme unter diesen Gesichtspunkten zu bewerten und die Eigenschaften von Raumluftströmungen quantitativ zu erfassen. Dies geschieht dadurch, daß man den jeweils

interessierenden Luft- oder Schadstoffstrom (z.B. gesamter Zuluftstrom, Zuluftstrom einzelner Durchlässe, Luftströme bestimmter Raumzonen, kontaminierte oder thermisch belastete Raumluft) mit einem Spurengas markiert (siehe Bild 1). Anhand von Luftproben, deren Spurengasgehalt man mit einem PC-gesteuerten Gasanalysator ermittelt, wird sowohl die zeitliche Änderung der örtlichen Spurengaskonzentration als auch die stationäre Endverteilung im Raum erfaßt und in Form von charakteristischen Kennzahlen ausgewertet.

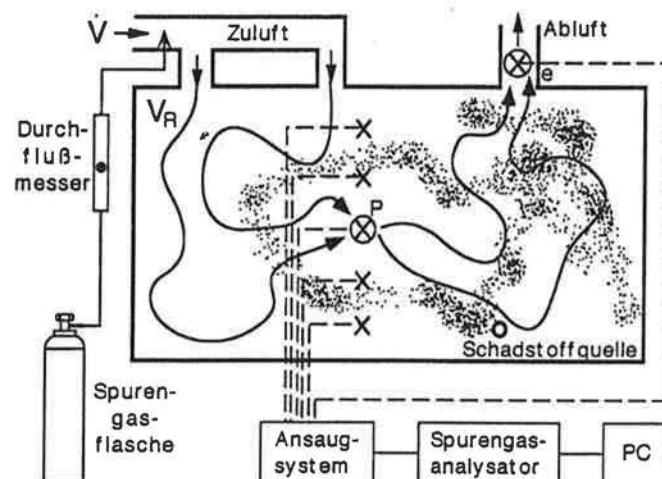
Es gibt hierfür drei Standard-Meßverfahren: die Step-up-, die Step-down- und die Puls-Methode. Bei der Step-up-Methode wird der Raum durch eine zeitlich konstante Zugabe von Spurengas aufkonzentriert. Bei der Step-down-Methode nimmt man die Abklingkurve nach Beenden der Spurengaszufuhr auf, ausgehend von dem stationären Konzentrationsfeld, das sich nach einem Step-up-Versuch einstellt. Bei der Puls-methode wird in den Raum kurzzeitig Spurengas eindosiert ( $\Delta t_p \ll \tau_n$  mit der nominalen Zeitkonstanten  $\tau_n = 1/n$  und dem Luftwechsel  $n$ ), so daß ein steiler Anstieg des Konzentrationsverlaufes gefolgt von einem Abfall auftritt (siehe Bild 2).

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Versuchsplanung und -durchführung ist insgesamt mit derjenigen bei der Strömungssichtbarmachung mit Rauch vergleichbar. Zur einfacheren und eindeutigeren Interpretation der aus den Spurengasversuchen gewonnenen Kennzahlen ist es sogar empfehlenswert, einen Rauchversuch durchzuführen. Bei ähnlicher Dosierung und Ausbreitung von Rauch und Spurengas vom jeweiligen Emissionsort wird die Spurengasmesung dabei letztendlich den qualitativen Eindruck, den man vom Strömungsbild aus dem Rauchversuch erhält, bestätigen, ihn aber darüber hinaus noch quantitativ kennzeichnen.

## Modified pulse method to determine air exchange efficiency

The main problems with the application of the pulse method are high curvatures and low signal-to-noise ratios making it difficult to accurately resolve the local concentration curves. The reason for this is the demand of a dosing period  $\Delta t_p$  being negligible small in comparison with the nominal time-constant  $\tau_n$  of the room. From a single-zone-model an analytical relation was derived that takes finite dosing periods  $\Delta t_p$  into account and hence extends the applicability of the pulse method.

*Keywords:* air exchange efficiency, ventilation effectiveness, pulse method, tracer gas

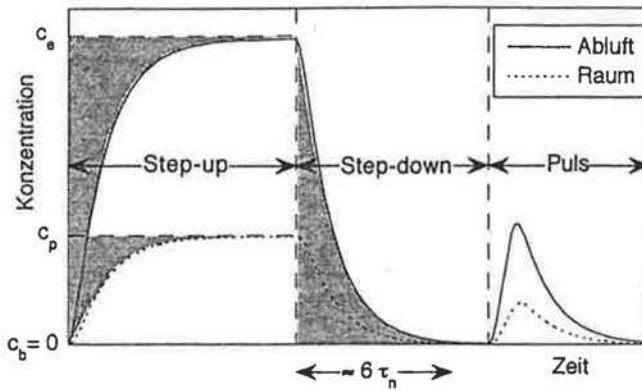


**Bild 1**  
Unterschiedliche Strompfade der Zuluft und eines Schadstoffes zu einem Punkt p

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



**Bild 2**  
Örtliche Spurengaskonzentrationsverläufe bei Markierung eines einzelnen Zuluftdurchlasses



## 1. Gegenüberstellung der konventionellen Pulsmethode und der Step-up- bzw. Step-down-Methode

Auf die Bestimmung der interessierenden Kenngrößen der Lüftungseffektivität und Lüftungswirksamkeit wird hier nur kurz eingegangen, ausführlichere Darstellungen findet man in [1, 2, 3].

Aus den zeitlichen Konzentrationsverläufen erhält man durch Integration die örtlichen Ankunftszeiten bzw. das Alter der Luft oder des Schadstoffes  $\tau_p$ . Diese geben an, wie sich der markierte Strom ausgehend vom Emissionsort zum Abluftkanal bewegt. Anschaulich entsprechen diese Zeiten bei der Step-up- und der Step-down-Methode den markierten Flächen zwischen dem Konzentrationsverlauf und der jeweiligen stationären Endkonzentration (Bild 2). Durch arithmetische Mittelung der einzelnen lokalen Alter ergibt sich formal das Durchschnittsalter des markierten Stromes im Raum  $\langle \tau \rangle$ . Meßtechnisch erhält man diesen Wert aus einer speziellen Auswertung des Konzentrationsverlaufes im zentralen Abluftkanal. Die Alter  $\tau_p$  und  $\langle \tau \rangle$  werden auf das lokale Alter im zentralen Abluftkanal  $\tau_e$  bezogen ( $e = \text{exit}$ ). Bei Markierung der gesamten Zuluft mit Spurengas sind für die Kehrwerte dieser relativen Größen im englischsprachigen Raum die Begriffe lokaler und globaler Luftaustauschindex  $\mathcal{E}_p$  und  $\mathcal{E}$  gebräuchlich. Das Bezugssystem ist die ideale Mischlüftung mit  $\mathcal{E}_p = \mathcal{E} = 1$ , es sind daher möglichst Werte größer als eins anzustreben [5].

Zur Bestimmung der einzelnen Alter müssen die sog. Momente  $\mu_k^{(m)}$  [ $s^{m+1}$ ]  $m$ -ter Ordnung ( $0 \leq m \leq 2$ ) der zeitlichen Spurengaskonzentrationsänderungen  $c_k(t) = c_{k,\text{mess}}(t) - c_{b,k}$  bestimmt werden. Die Größe  $c_{k,\text{mess}}(t)$  bezeichnet die gemessene örtliche Konzentration und  $c_{b,k}$  die Hintergrundkonzentration, die i. a. der Außenluftkonzentration entspricht (Tabelle 1).

$$\mu_k^{(m)} = \int_0^{\infty} c_k^*(t) t^m dt \quad (1)$$

Die Ermittlung der Momente erfordert

einen relativ großen meßtechnischen Aufwand. Aufgrund der endlichen Analysierzeit des Gasanalysators ist die Anzahl der Meßpunkte, an denen gleichzeitig die lokale Ankunftszeit bestimmt werden kann, begrenzt, z. B. bei  $n = 5 \text{ h}^{-1}$  auf  $\leq 8$ . Weiterhin erhält man über den gesamten Meßzeitraum von  $\approx 6 \tau_n$  (siehe Bild 2) für jeden Punkt  $p$  nur einen einzigen Meßwert  $\tau_p$ . Wegen dieser verfahrensbedingten Nachteile ist die Bestimmung des zeitlichen Ausbreitungsverhaltens nur an einigen, gezielt auszuwählenden Punkten im Raum möglich.

Die mengenmäßige Verteilung der Zuluft einzelner oder aller Durchlässe bzw. eines Schadstoffes ergibt sich bei der Step-up-Methode aus dem sich einstellenden stationären Endkonzentrationsfeld im Raum, d. h. durch Messung der örtlichen Endkonzentration  $c_p$ , der Konzentration im Zu- und im Abluftkanal  $c_s$  ( $s = \text{supply}$ ) und  $c_e$  sowie der Durchschnittskonzentration im gesamten Raum  $\langle c \rangle$ , die jedoch auch über den Konzentrationsverlauf im zentralen Abluftkanal bestimmbar ist. Die Größen  $c_p$  und  $\langle c \rangle$  werden bei Markierung von Schadstoffquellen auf  $c_e$  bezogen und im deutschsprachigen Raum als Kontaminationsgrad bezeichnet.

Zum gleichen Resultat gelangt man im

**Tabelle 1** Bestimmung der lokalen Alter  $\tau_k$  und des Raumdurchschnittsalters  $\langle \tau \rangle$  aus den Konzentrationsverläufen  $c_k^*(t)$ ; der Index  $k$  steht für Meßpunkte im zentralen Zu- bzw. Abluftkanal  $s$  bzw.  $e$  oder einzelne Punkte  $p$  im Raum

Methode	$\tau_k$	$\langle \tau \rangle$	$c_k^*(t)$
Step-up	$\mu_k^{(0)}$	$\frac{\mu_c^{(1)}}{\mu_e^{(0)}}$	$1 - \frac{c_k(t)}{c_k(\infty)}$
Step-down	$\mu_k^{(0)}$	$\frac{\mu_e^{(1)}}{\mu_e^{(0)}}$	$\frac{c_k(t)}{c_k(0)}$
konv. Puls	$\frac{\mu_k^{(1)}}{\mu_k^{(0)}}$	$\frac{\mu_e^{(2)}}{2\mu_e^{(1)}}$	$c_k(t)$
$c_k(t)$ : Konzentrationsverlauf am Punkt $k$ $c_k(\infty)$ : Endkonzentration für $t \rightarrow \infty$ am Punkt $k$ $c_k(0)$ : Anfangskonzentration bei $t=0$ am Punkt $k$			

Prinzip mit der Pulsmethode, wenn man die nullten Momente  $\mu_p^{(0)}, \mu_s^{(0)}, \mu_e^{(0)}$  und  $\mu_e^{(0)}$  der Konzentrationsverläufe eines Pulsversuches ins Verhältnis setzt [3, 4]. Voraussetzung hierfür ist, daß die bei einem Step-up-Versuch konstante und bei einem Pulsversuch kurzzeitige Spurengasfreisetzung am selben Ort und auf dieselbe Weise in die gleiche Raumluftströmung erfolgt. Die Bedeutung der Größen „nulltes Moment“ und „Konzentration im stationären Zustand“ ist daher identisch.

Die Meßgenauigkeit der stationären Endkonzentrationen, der nullten Momente bei der Pulsmethode und der Ankunftszeiten ist insgesamt vergleichbar. Jedoch erfordern die Messung und die Auswertung der stationären Konzentrationen einen wesentlich geringeren zeitlichen Aufwand. Prinzipiell reicht schon jeweils eine untersuchte Probe zur Ermittlung der relativen Größen aus. Da die Vermessung eines stationären Zustandes jedoch nicht zeitkritisch ist und Raumluftströmungen turbulent sind, werden in der Regel mehrere Meßwerte über einen längeren Zeitraum gemessen und arithmetisch gemittelt. Über die Standardabweichung dieses Mittelwertes erhält man dann vergleichbar dem Turbulenzgrad eine wichtige Zusatzinformation über die Stabilität der Strömung. Aufgrund dieser verfahrensbedingten Vorteile ist die Ermittlung der stationären Konzentrationen speziell in Form von sog. Kontaminationsgraden von Schadstoffen das derzeit verbreitetste Beurteilungskonzept.

In der Praxis wird die konventionelle Pulsmethode im Vergleich zur Step-up- oder Step-down-Methode nur selten benutzt. Ursache hierfür ist die Forderung, daß die Pulsdauer  $\Delta t_p$  im Vergleich zur nominalen Zeitkonstanten des Raumes  $\tau_n = V/n$  vernachlässigbar klein sein muß. Dies führt zu den folgenden Nachteilen

und zu dem Schluß, daß sich die konventionelle Pulsmethode für praktische Anwendungen nicht eignet [5]:

- Die ausreichend genaue Auflösung des kurzzeitig auftretenden Konzentrationsanstiegs erfordert eine Mindest-Datenrate von 20 Werten /  $\tau_n$ . Diese ist im Vergleich zur Step-up- oder

Step-down-Methode mit nur 2,5 Werten /  $\tau_n$  sehr groß. Die Anzahl der während einer Messung gleichzeitig zu bestimmenden örtlichen Konzentrationsverläufe ist daher bei der konventionellen Pulsmethode achtmal kleiner.

- Sämtliche verwendeten Spurengase sind schwerer als Luft. Aus diesem Grund ist die Konzentration am Emissionsort bzw. die bei der konventionellen Pulsmethode innerhalb der kurzen Pulsdauer  $\Delta t_p$  in den Raum eingebrachte Spurengasmenge ebenfalls begrenzt ( $SF_6 < 83 \text{ ppm}$ ,  $N_2O < 640 \text{ ppm}$  [6]). Durch das dann geringe Signal-Rausch-Verhältnis von maximaler Konzentration und Hintergrundrauschen des Gasanalysators wird die Auswertegenauigkeit stark beeinträchtigt.
- Der Wert aller Integrale wird in erster Linie durch die räumliche Konzentrationsverteilung unmittelbar nach dem Abbruch des „Pulses“ bestimmt. Inwieweit diese Verteilung repräsentativ ist, ist daran gebunden, ob zum Zeitpunkt des kurzen „Pulses“ ein „typisches“ Raumluftströmungsbild vorgelegen hat oder nicht.

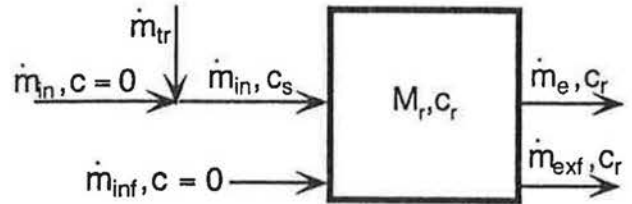
**2. Grundlagen der modifizierten Pulsmethode**

Wie im folgenden gezeigt wird, lassen sich die geschilderten Probleme mit Hilfe einer endlichen Pulsdauer  $\Delta t_p$  („modifizierte Pulsmethode“) weitgehend vermeiden. Allerdings darf dann die Berechnung der Kenngrößen nicht in üblicher Weise entsprechend Tabelle 1 vorgenommen werden. Zur Herleitung der notwendigen Modifizierung des Auswerteverfahrens wird ein Pulsversuch mit endlicher Pulsdauer  $\Delta t_p$  in einem vollständig durchmischten Raum betrachtet (siehe Bild 3). In diesem Bild bezeichnet  $\dot{m}_{tr}$  den gegenüber dem Außenluftstrom  $\dot{m}_{in}$  vernachlässigbar kleinen Spurengasstrom,  $\dot{m}_{inf}$  und  $\dot{m}_{exf}$  stehen für unkontrolliert ein- bzw. austretende Leckageluftströme. Da die modifizierte Pulsmethode nur zur Bestimmung der Lüftungseffektivität einzelner oder aller Zuluftdurchlässe sinnvoll ist (was später noch begründet wird), erfolgt die Herleitung lediglich für eine Zudosierung des Spurengases in den Zuluftkanal. Die Ergebnisse sind jedoch auf beliebige Dosierorte im Raum übertragbar.

Aus der Spurengasmassenbilanz im Raum (siehe Bild 3) ergibt sich  $dc_r/dt + c_r/\tau_n = 1/\tau_r$  mit den Zeitkonstanten  $\tau_n = M_r / (\dot{m}_{in} + \dot{m}_{inf})$ ,  $\tau_r = M_r / \dot{m}_{tr}$  und der Konzentration im stationären Zustand  $\tau_n / \tau_r = c_r(\infty)$ .

Im ersten Zeitintervall  $0 \leq t \leq \Delta t_p$  beträgt

**Bild 3**  
**Luft- und Spurengasmassenströme in einem vollständig durchmischten Raum**



die Konzentration in der Zuluft  $c'_s(t) = \dot{m}_{tr} / \dot{m}_{in}$ , im zweiten Zeitintervall  $\Delta t_p \leq t < \infty$  ist sie  $c''_s(t) = 0$ . Die Momente und das lokale Alter ergeben sich dann bei konventioneller Auswertung gemäß Tabelle 1 zu

$$\mu_s^{(0)} = \int_0^{\Delta t_p} c'_s(t) dt + \int_{\Delta t_p}^{\infty} c''_s(t) dt = \frac{\dot{m}_{tr}}{\dot{m}_{in}} \Delta t_p$$

und

$$\mu_s^{(1)} = \int_0^{\Delta t_p} c'_s(t)t dt + \int_{\Delta t_p}^{\infty} c''_s(t)t dt = \frac{\dot{m}_{tr}}{\dot{m}_{in}} \frac{\Delta t_p^2}{2}$$

$$\tau_{s,pu} = \frac{\mu_s^{(1)}}{\mu_s^{(0)}} = \frac{\Delta t_p}{2} \tag{2}$$

Der Index „pu“ steht im folgenden für ein Alter, das mit der modifizierten Pulsmethode, aber herkömmlicher Auswertung der Momente bestimmt wurde. Zur Bedeutung der Größe  $\tau_{s,pu}$  ist zu sagen, daß sie kein Alter bzw. keine Ankunftszeit im eigentlichen Sinne des Wortes darstellt, da sie nur aus der endlichen Pulsdauer  $\Delta t_p$  resultiert.

Im ersten Zeitintervall beträgt die Konzentration im Raum  $c'_r(t) = \tau_n / \tau_r \cdot (1 - e^{-t/\tau_n})$  und im zweiten ist sie  $c''_r(t) = \tau_n / \tau_r \cdot (e^{-\Delta t_p/\tau_n} - 1) \cdot e^{-t/\tau_n}$ . Die Berechnung der Momente geschieht nun analog zu der im Zuluftkanal bzw. nach Tabelle 1. Für das lokale Alter im Raum und das Raumdurchschnittsalter ergibt sich dann

$$\tau_{r,pu} = \frac{\mu_r^{(1)}}{\mu_r^{(0)}} = \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta t_p}{\tau_n} \right) \tau_n \tag{3}$$

$$\langle \tau \rangle_{pu} = \frac{\mu_r^{(2)}}{2\mu_r^{(1)}} = \left( 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{\Delta t_p}{\tau_n} \right)^2 \right) \tau_n \tag{4}$$

Die Gleichungen 3 und 4 zeigen, daß bei konventioneller Auswertung der Konzentrationsverläufe das „wahre“ lokale Alter, das bei vollständiger Durchmischung  $\tau_r = \tau_n$  beträgt, um den Betrag  $\Delta t_p / 2$  zu hoch bestimmt würde. Dieser Wert entspricht genau dem lokalen Alter im Zuluftkanal  $\tau_{s,pu}$ . Der „wahre“ Wert des Raumdurchschnittsalters  $\langle \tau \rangle = \tau_n$  würde ebenfalls in Abhängigkeit von  $\Delta t_p$  zu hoch berechnet werden.

Bei einer konstanten Spurengasdosierung im Zeitintervall  $0 \leq t \leq \Delta t_p$  lassen

sich demnach die durch die konventionelle Auswertung bestimmten Größen  $\tau_{p,pu}$ ,  $\tau_{e,pu}$  und  $\langle \tau \rangle_{pu}$  wie folgt korrigieren

$$\tau_p = \tau_{p,pu} - \frac{\Delta t_p}{2}$$

$$\tau_e = \tau_{e,pu} - \frac{\Delta t_p}{2} \tag{5a}$$

$$\langle \tau \rangle = \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta t_p}{\tau_e} \right) \langle \tau \rangle_{pu} - \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \frac{\Delta t_p}{\tau_e} \right) \Delta t_p \tag{6}$$

Man erkennt, daß es für diese Korrektur nicht erforderlich ist, das lokale Alter im Zuluftkanal  $\tau_{s,pu}$  tatsächlich zu messen, es genügt die Kenntnis der Pulsdauer  $\Delta t_p$ . Weiterhin geht aus den Gleichungen 5a und 6 für vernachlässigbar kleine Pulsdauer  $\Delta t_p \rightarrow 0$  hervor, daß die konventionelle Pulsmethode ein Spezialfall der modifizierten Pulsmethode darstellt.

Eine Korrektur der nullten Momente zur Bestimmung der stationären Verteilung eines markierten Stromes im Raum ist nicht notwendig, da der jeweilige lokale Mengenanteil proportional zur Pulsdauer bzw. freigesetzten Spurengasmenge ist.

Das Verfahren läßt im Prinzip auch eine zeitlich und mengenmäßig willkürliche Spurengasfreisetzung zu, wenngleich sich diese jedoch nicht empfiehlt. Die lokalen Alter können zwar ebenfalls mit dem lokalen Alter im Zuluftkanal  $\tau_{s,pu}$  korrigiert werden, dieses ist dann aber tatsächlich zu messen, und man verliert eine Meßstelle an den Zuluftkanal. Außerdem existiert dann keine allgemeingültige Korrektur für das Raumdurchschnittsalter:

$$\tau_p = \tau_{p,pu} - \tau_{s,pu}$$

$$\tau_e = \tau_{e,pu} - \tau_{s,pu} \tag{5b}$$

Ein streng mathematischer Beweis der Korrekturbeziehungen 5a, 5b und 6 für beliebige Raumluftströmungen ist nicht möglich. Dies würde eine Lösung der vollständigen Navier-Stokes- und Stoff-erhaltungsgleichungen voraussetzen. Die rein analytische Herleitung gelingt nur für einfache Strömungskonfigurationen, wie die vollständige Durchmischung oder die Kolbenströmung. Die Übertragbarkeit auf jede Art von



Raumluftströmung wurde deshalb mit Hilfe des Mehr-Zonen-Modells CONTAM 86 [7] geprüft und nachgewiesen. Mit diesem Modell lassen sich durch Unterteilung des Raumes in Zonen bestimmte Typen von Raumluftströmungsmustern, wie z.B. Quelllüftung, unvollständige Durchmischung oder Kurzschluß, simulieren.

Die allgemeine Anwendbarkeit der modifizierten Pulsmethode wurde zusätzlich durch Laboruntersuchungen in einem 24 m<sup>2</sup> großen Modellraum belegt, der mit vier unterschiedlichen Luftführungssystemen ausgestattet ist. Sie erwies sich dabei als ebenso zuverlässig wie die Step-up- oder Step-down-Methode. Bei Markierung der gesamten Zuluft mit Spurengas und stabiler Raumluftströmung lagen die Abweichungen zwischen den Verfahren innerhalb der Reproduzierbarkeit der dimensionslosen Größen von  $\pm 3\%$ .

### 3. Vorteile der modifizierten Pulsmethode

Untersuchungen der mit CONTAM 86 künstlich erzeugten Konzentrationsverläufe haben gezeigt, daß bei einer Mindest-Pulsdauer von  $\Delta t_p \geq 1,5 \tau_n$  unabhängig von der Raumluftströmung eine Mindest-Datenrate von  $2,5 \text{ Werten}/\tau_n$  wie bei der Step-up- oder Step-down-Methode ausreicht; die relative Abweichung der einzelnen Momente und Alter war bei Verwendung eines Interpolationspolynoms vierter Ordnung zur Auswertung [5] immer  $\leq 1\%$  bezogen auf den Sollwert. Letztendlich stellt die modifizierte Pulsmethode die Kombination eines vorzeitig abgebrochenen Step-up-Versuches mit anschließendem Step-down-Versuch dar.

Verlängert man die Pulsdauer auf  $\Delta t_p \geq 2,5 \tau_n$ , ist es außerdem möglich, den ersten Teil des Konzentrationsverlaufes als Step-up-Versuch auszuwerten, da mit der Mindest-Datenrate von  $2,5 \text{ Werten}/\tau_n$  dann genügend Meßwerte für eine zuverlässige Extrapolation des Konzentrationsverlaufes [5] vorhanden sind. Auf diese Weise erhält man aus einem einzigen Verlauf zwei Werte des lokalen Alters. Der eine Wert gibt dabei die Strömungsbedingungen im Zeitintervall  $0 \leq t \leq \Delta t_p$  wieder, der andere diejenigen im gesamten Zeitraum  $0 \leq t < \infty$ . Bei stabiler Raumluftströmung sind beide Werte identisch, größere Abweichungen sind ein Maß für die Instabilität.

Bei letztgenannter Vorgehensweise stellt sich bei der Auswertung des Step-up-Versuches jedoch das Problem, daß die Endkonzentration im stationären Zustand  $c_k(\infty)$  nicht direkt gemessen wird (siehe Tabelle 1). Sie läßt sich aber

indirekt aus dem nullten Moment und der Dosierdauer bestimmen [3, 4]:

$$c_k(\infty) = \mu_k^{(0)} / \Delta t_p \quad (7)$$

### 4. Vergleich der modifizierten Pulsmethode mit der Step-up- oder Step-down-Methode

Die Bewertung der verschiedenen Methoden ist abhängig davon, ob die zeitliche Ausbreitung und die stationäre Verteilung im Raum oder nur die stationäre Verteilung bestimmt werden soll.

Steht die detaillierte Kenntnis der stationären Verteilung von Schadstoffen oder der Zuluft einzelner Durchlässe im Mittelpunkt des Interesses, und muß man sich z.B. aus zeitlichen Gründen darauf beschränken, die lokalen Alter nur an wenigen ausgewählten Punkten zu ermitteln, ist die schnelle und einfache Vermessung eines stationären Konzentrationsfeldes der modifizierten Pulsmethode vorzuziehen. Außerdem erhält man dann an jedem Punkt neben dem Mittelwert die Standardabweichung. Der Pulsversuch liefert dagegen nur einen einzigen Wert des nullten Momentes. Ob stabile Strömungsverhältnisse vorliegen und der gemessene Wert des nullten Momentes somit als zuverlässig angesehen werden kann, läßt sich hier nur qualitativ durch Betrachten des Konzentrationsverlaufes eines Pulsversuches beurteilen.

Ist zur Beurteilung der Wirkung einzelner oder aller Durchlässe die Kenntnis der zeitlichen Ausbreitung und der stationären Verteilung erforderlich, arbeitet man am besten mit der modifizierten Pulsmethode. Beide Ausbreitungscharakteristiken lassen sich unmittelbar aus dem örtlichen Konzentrationsverlauf bestimmen. Der zeitliche Verlauf kann hierbei z.B. über Kurzschlußanteile Aufschluß geben [5], die die Lüftungsfunktion u.U. stark herabsetzen. Wird eine einmalige Messung des lokalen Alters an einer bestimmten Stelle als ausreichend angesehen, ergibt sich bei der modifizierten Pulsmethode mit  $\Delta t_p \approx 1,5 \tau_n$  zwar eine etwas längere Meßdauer von etwa  $7 \tau_n$  im Vergleich zu einem einzelnen Step-up- oder Step-down-Versuch mit  $6 \tau_n$ , jedoch sind die Messung und Auswertung etwas einfacher durchzuführen. Ist eine zweimalige Messung des lokalen Alters an derselben Stelle erforderlich, besitzt die modifizierte Pulsmethode bei  $\Delta t_p \approx 2,5 \tau_n$  gegenüber der Vorgehensweise einer zyklischen Abfolge von Step-up- und Step-down-Versuchen [5] den Vorteil, daß sich die Meßzeit von etwa  $2 \cdot 6 \tau_n$  auf  $8 \tau_n$  bei einem gleichzeitig geringeren Verbrauch an Spurengas verkürzt. Bei

einem nominalen Anteil des Luftstromes des betrachteten Durchlasses von  $> 25\%$  am gesamten Zuluftstrom und bei stabiler Raumluftströmung ergeben sich für das stationäre Konzentrationsfeld in der Regel geringe Standardabweichungen von  $\leq 10\%$ . Die Kenntnis dieses Wertes ist dann nicht notwendig, so daß die stationäre Verteilung auch mit Hilfe der modifizierten Pulsmethode ermittelt werden kann.

Insgesamt stellt somit die hier vorgestellte modifizierte Pulsmethode eine wertvolle Ergänzung der beiden Standard-Spurengasmeßverfahren (Step-up- und Step-down-Methode) dar. Die Durchführung von Spurengasmessungen wird dadurch für zahlreiche, hier genannte Anwendungsfälle erleichtert.

### Danksagung

Diese Untersuchung wurde von der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik FLT e.V., Frankfurt/Main, finanziell unterstützt.

### Literatur

- [1] Jung, A., Zeller, M.: Bestimmung der Lüftungseffektivität und der Lüftungswirksamkeit mit Spurengasen – Gegenüberstellung anhand von Laboruntersuchungen an einem Quelllüftungssystem. DKV-Tagungsbericht 20 (1993), Bd. 4, S. 187–201
- [2] Jung, A., Zeller, M.: Einsatz der Spurengastechnik zur Bestimmung der Lüftungseffektivität bei in situ-Messungen. DKV-Tagungsbericht 22 (1995), Bd. 4, S. 121–140
- [3] Jung, A., Zeller, M.: Using a Finite Dosing Period with the Pulse Method and Considering Recirculation when Determining the Air Exchange Efficiency. Proceedings of Roomvent '96, Vol. 3, pp. 71–79, Yokohama, Japan, 1996
- [4] Jung, A., Zeller, M.: Zur Prüfung von OP-Luftführungen bei stoßartiger Schadstoffbelastung. Heizung-Lüftung-Haustechnik HLH, 47 (1996), 10, S. 58–61
- [5] Jung, A., Zeller, M.: An Analysis of Different Tracer Gas Techniques to Determine the Air Exchange Efficiency in a Mechanically Ventilated Room. Proceedings of Roomvent '94, Vol. 2, pp. 315–332, Krakow, Poland, 1994
- [6] Grieve, P. W.: Measuring Ventilation Using Tracer Gases. Brüel & Kjær Co., Nærum, Denmark, 1989
- [7] Axley, J.: Indoor Air Quality Modeling. Phase II Report, NBSIR 87-3661, U.S. Department of Commerce, NBS, Githersburg, USA, 1987

### Schlüsselwörter

Lüftungseffektivität  
Lüftungswirksamkeit  
Spurengas  
Pulsmethode