

# FORTSCHRITTE BEI DER LUFTWECHSELMESSUNG DURCH MIKROCOMPUTEREINSATZ



A

Luftwechselzahlen werden mit einem Infrarot-Gasanalysator bestimmt, wobei Lachgas ( $N_2O$ ) als Markierungssubstanz verwendet wird. Der Analysator ist mit einem Mikrocomputer gekoppelt, dessen Programme den Meßablauf, die Erfassung der Daten und deren Auswertung steuern und vollziehen. Die Programme ermöglichen eine sofortige Verfügbarkeit der Ergebnisse von Kurzzeitmessungen. Der Geräteaufbau ist in kompakter Form auf einem fahrbaren Meßstand installiert.

In einem Laborraum wurden Testmessungen durchgeführt, um die Luftwechselzahlen unter verschiedenen Bedingungen zu bestimmen. Dabei wurden die Konzentrationsabfall-Methode und die Methode konstanter Emission des Spurengases untersucht. Typische Ergebnisse werden dargestellt und zeigen, welche der beiden Methoden bei den jeweiligen Bedingungen vorteilhafter ist. Aus der Beschreibung der Meßverfahren und ihrer Auswertung ergibt sich die Zweckmäßigkeit des Mikrocomputereinsatzes.

Prof. Dr.-Ing. Frank-Dietrich Heidt,  
Fachbereich Physik,  
Universität-Gesamthochschule Siegen

## Einführung

Der zwischen dem effektiven Rauminhalt  $V$  eines Gebäudes oder Gebäudeteils und seiner Umgebung ausgetauschte Luftvolumenstrom  $Q$  bzw. die Luftwechselzahl  $n$  gehören zu den in der Bauphysik weniger gut verstandenen Kenngrößen. Zwischen ihnen besteht die Beziehung

$$Q = n \cdot V \quad (1)$$

Die Luftwechselzahl hängt von der Baukonstruktion und -ausführung (Fugenlängen, Dichtigkeit), von meteorologischen Parametern (thermische und strömungsbedingte Druckgradienten) sowie vom Bewohnerverhalten (Nutzungsart, zeitliches Profil, Gewohnheiten) in vielfältiger Weise ab [1]. Bild 1 stellt den komplexen Einfluß der verschiedenen Parameter auf den Luftaustausch schematisch dar.

Andererseits ist die Kenntnis des Luftwechsels notwendig für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden und für die Abschätzung von Raumluftqualität und Raumfeuchte. Sein Einfluß auf den Wärmebedarf wächst mit zunehmender Wärmedämmung, wobei der durch Lüftung verursachte Anteil der Heizenergie durchaus über 50% betragen kann [2]. Die stationären Konzentrationen unerwünschter oder gar schädlicher Luftinhaltsstoffe (z.B. Tabakrauch, Formaldehyd, Radon) oder von Wasserdampf nehmen mit steigender Luftwechselzahl ab, so daß gewisse Mindestluftwechsel empfohlen werden [3, 4]. Die energetische sowie hygienische und gesundheitstechnische Bedeutung des Luftwechsels erfordert somit Messungen für die verschiedenen in der Praxis auftretenden Bedingungen. Dies gilt um so mehr, als theoretische Ermittlungen der Luftwechselzahl aus den eingangs genannten Gründen nur grobe Anhaltspunkte liefern können.

## Meßmethoden und ihre Genauigkeit

In Betracht kommen Methoden, mit denen die Luftdichtigkeit eines Raumes oder Gebäudes unter natürlichen Bedingungen charakterisiert wird, d.h. ohne künstlich erzeugte Druckdifferenz zwischen einem Volumen und seiner Umgebung. Zur Bestimmung dieses natürlichen Luftwechsels können Messungen des zeitlichen Verlaufs von Spurengaskonzentrationen in drei experimentellen Varianten benutzt werden [5]:

1. Konzentrationsabfall-Methode,
2. Konstante Abgabe des Spurengases,
3. Konstante Konzentration des Spurengases.

In der vorliegenden Arbeit werden die beiden ersten Methoden detailliert untersucht und erprobt. Methode 3 erfordert eine vergleichsweise aufwendigere und teurere experimentelle Ausstattung als die für Methoden 1 und 2. Sie wird deshalb hier nicht weiter betrachtet, obwohl sie den Vorteil langfristiger und automatisierbarer Messungen bieten würde.

Die Methode 1 ist die bekannteste, obwohl diesbezügliche Messungen zumindestens in der Bundesrepublik Deutschland vergleichsweise selten durchgeführt und publiziert werden, z.B. in [6]. Ein Grund hierfür mag sein, daß die Ausführung, Dokumentation und Auswertung von Messungen in der bisher üblichen Verfahrensweise mit nicht geringem Aufwand ver-

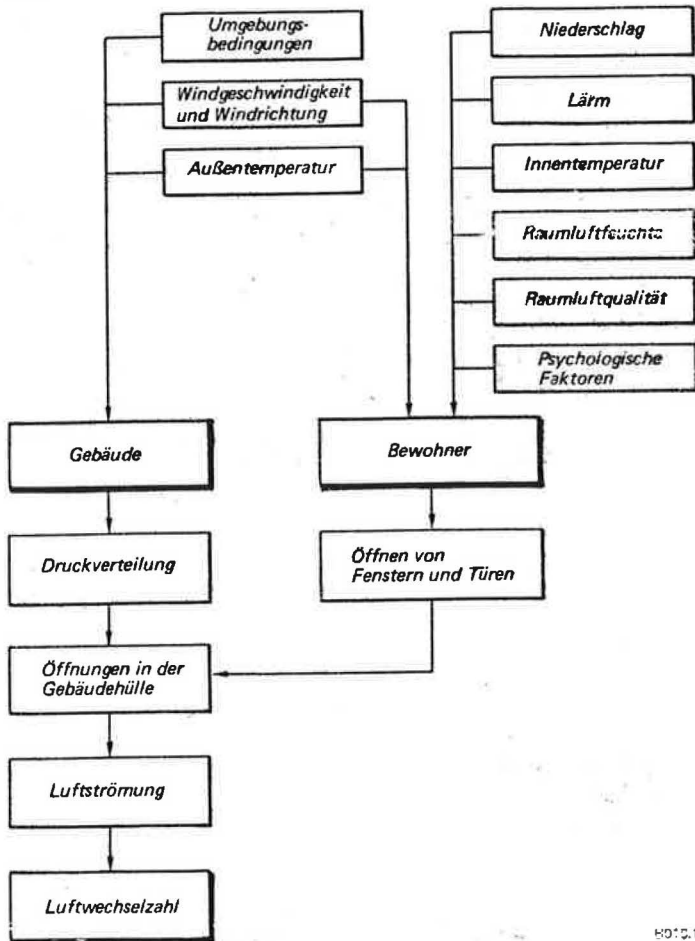


Bild 1: Zusammenwirken verschiedener Einflußfaktoren auf den Luftwechsel unter Berücksichtigung der Bewohner. Modifiziert aus [1]

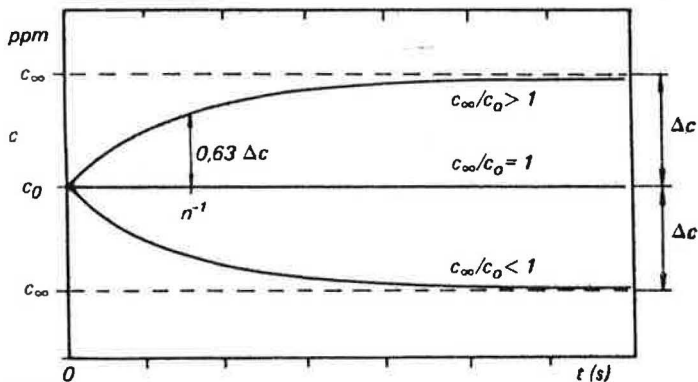


Bild 2: Typische Verläufe der Tracergaskonzentration über der Zeit. Die Art des Verlaufs hängt vom Parameter  $C_{\infty}/C_0$  ab

bunden ist. Dieser kann durch den Einsatz eines Mikrocomputers erheblich reduziert werden.

Das Hauptanliegen dieser Arbeit sind deshalb Verbesserungen der experimentellen Vorbereitungen und Abläufe einer Messung nach Methode 1 oder 2 sowie insbesondere der Meßdatenerfassung und -verarbeitung durch Kopplung der Spurengasmessungen mit einem Mikrocomputer. Die erhaltenen Meßergebnisse sind jedoch lediglich als Beispiele zu verstehen, mit denen im jeweilig betrachteten Fall der typische Schwankungsbereich der Meßwerte demonstriert wird.

Das Prinzip der Meßverfahren beruht darauf, daß ein inertes Spurengas homogen mit der Raumluft vermischt und seine Konzentration in ihr als Funktion der Zeit vermessen wird. Die Auswertung dieser Zeitreihe gestattet dann eine Berechnung der Luftwechselzahl  $n$  bzw. des ausgetauschten Luftvolumen-

stroms  $Q$ . Bezeichnet man die dimensionslose Konzentration des Spurengases mit  $C$  (z.B. in ppm), so ergibt sich aus der Massenbilanz an einem Kontrollvolumen die sogenannte Kontinuitätsgleichung:

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = (C_a - C) \cdot Q + F \quad (2)$$

Dabei ist  $V$  das effektive Volumen des Luftaustauschs, d.h. derjenige Teil des Kontrollvolumens, der vom Luftwechsel beeinflusst wird;  $F$  ( $m^3 h^{-1}$ ) ist der injizierte Volumenstrom des Markierungsgases, und der Index  $a$  bezeichnet die Außenluft. Die Differentialgleichung (2) ist für die Anfangsbedingung

$$C(t = 0) = C_0 \quad (3)$$

zu lösen. Verwendet man ein Spurengas, das normalerweise in der Umgebung nicht enthalten ist,

$$C_a = 0 \quad (4)$$

so ergibt sich mit der Abkürzung:

$$C_{\infty} = F/Q \quad (5)$$

die Spurengas-Konzentration  $C(t)$  aus den Gleichungen (1) bis (5) zu:

$$C(t) = C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty}) \cdot \exp(-nt) \quad (6)$$

Bild 2 zeigt das typische Zeitverhalten der Tracergaskonzentration  $C(t)$ , das vom Quotienten  $C_{\infty}/C_0$  abhängt. Lachgas ( $N_2O$ ) ist eine geeignete Markierungssubstanz, die auch noch aus einer Reihe weiterer Gründe gerne als Spurengas eingesetzt wird [7]

Für Methode 1 – Konzentrationsabfall,  $C_{\infty} = 0$  – läßt sich die Luftwechselzahl  $n$  unmittelbar aus Gl. (6) bestimmen:

$$n = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C(t)} \text{ bzw. } n = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{C(t)}{C(t + \Delta t)} \quad (7)$$

wobei  $t$  und  $\Delta t$  beliebige Zeitpunkte und -intervalle innerhalb der Meßdauer bedeuten. Für Methode 2 – konstante Emission,  $C_{\infty} > 0$  – kann  $n$  aus den Gln. (6), (5) und (1) jedoch nicht direkt analytisch, sondern nur durch numerische Iteration bestimmt werden.

Die Genauigkeit der Bestimmung der Luftwechselzahl hängt – wenn man die Zeit  $t$  als exakt meßbar betrachtet – von den Beobachtungsfehlern der Parameter

$$x_1 = C(t), x_2 = C_0 \text{ und } x_3 = C_{\infty} \quad (8)$$

ab. Aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich dann als Schätzwert der mittleren quadratischen Abweichung der Luftwechselzahl:

$$(\delta n)^2 = \sum_1^3 \left| \frac{\partial n}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right|^2 \quad (9)$$

$\delta$  bezeichnet die Abweichung einer Variablen von ihrem Mittelwert.

Für Methode 1 setzt man  $x_3 = \delta x_3 = 0$ . Durch Differentiation von Gl. (7) und Einsetzen in (9) erhält man:

$$(\delta n)^2 = \frac{1}{t^2} \left[ \left( \frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\delta C_0}{C_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Dabei werden  $\delta C_0$ ,  $C_0$  und  $\delta C$  als konstante Werte angesehen. Dann fällt der Fehler  $\delta n$  rasch mit wachsender Zeit  $t$  ab, bis die Konzentration  $C(t)$  ihrerseits klein wird und damit  $\delta n$  wieder vergrößert. Für die Auswertung liegen optimale Meßzeiten ungefähr bei  $t = 1/n$ . Da die Methode 1 normalerweise

nur für geringe bis mittlere Luftwechselzahlen eingesetzt wird, sind i.a. genügend viele Meßzeitpunkte mit hinlänglich kleinem Fehlereinfluß auf  $n$  verfügbar.

Bei Methode 2 stößt man auf die Schwierigkeit, daß  $n(x_1, x_2, x_3, t)$  nicht direkt angegeben werden kann und  $(\delta n)^2$  deswegen nicht unmittelbar aus (9) bestimmbar ist. Abhilfe schafft die aus Gl. (2) herleitbare Hilfsfunktion:

$$f(n, x_1, x_2, x_3) = x_1(t) - x_3 - (x_2 - x_3) \cdot \exp(-nt) = 0 \quad (11)$$

und ihre partiellen Ableitungen, für die gilt:

$$\frac{\partial n}{\partial x_1} = - \frac{\partial f / \partial x_1}{\partial f / \partial n} \quad (12)$$

Hiermit läßt sich  $(\delta n)^2$  aus Gl. (9) als Funktion der Zeit ermitteln. Das Verfahren ist elementar und seine Ausführung wird aus Platzgründen hier überschlagen. Nach einigen Umformungen erhält man den asymptotischen Wert des relativen Fehlers der Luftwechsellmessung aus:

$$\left(\frac{\delta n}{n}\right)^2 = \left(\frac{\delta C}{C_\infty}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta F}{F}\right)^2 \quad (13)$$

Wegen der zusätzlichen Abhängigkeit des Luftwechsels vom effektiven Volumen  $V$  und der Injektionsrate  $F$  sind die Fehler bei Methode 2 üblicherweise etwas größer als bei Methode 1.

### Meßstand und Verfahrensweise

Die experimentelle Ausstattung des Meßstands besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

- ▶ Gasanalysator mit RS 232-Schnittstelle,
- ▶ Mikrocomputer mit grafikfähigem Drucker,
- ▶ Injektionsapparatur für  $N_2O$ .

Sie ist in kompakter Form auf einem mobilen Träger angeordnet und ihr schematischer Aufbau ist in *Bild 3* dargestellt. *Bild 4* zeigt ein Foto des Meßstands.

Die zentrale Komponente des Meßsystems ist ein nicht-dispersiver Einstrahl-Infrarot-Gasanalysator (UNOR 6N der Firma Maihak, Hamburg), mit dem niedrige Konzentrationen von  $N_2O$  (1 bis 100 ppm) detektiert werden können. Seine physikalischen Prinzipien und Geräteeigenschaften sind an anderer Stelle beschrieben [8]. Eine RS 232-Schnittstelle ermöglicht die Kopplung des Analysators mit einem Mikrocomputer.

Der 64-kB-RAM-Mikrocomputer (ABC 24 der Firma ai-Electronics, Tokio, Japan) verfügt über zwei Laufwerke für doppel-seitige 5 1/4-Zoll-Disketten mit doppelter Schreibdicke sowie über einen hochauflösenden und grafikfähigen 12-Zoll-Bildschirm. Der ABC 24 ist über eine zweite serielle Schnittstelle an einen ebenfalls grafikfähigen Drucker angeschlossen.

Die Gasverteilung geschieht auf die in *Bild 3* skizzierte sehr einfache Weise: Das Gas strömt aus einer Vorratsflasche mit Druckminderungsventil in einen frei beweglichen Schlauch, an dessen Ende ein Ventilator für eine schnelle Vermischung mit der Raumluft sorgt. Bei Messungen mit konstanter Emission strömt das Gas durch ein Rotameter und wird durch ein von Hand einstellbares Ventil auf konstanten Durchfluß reguliert. Bei Eichungen fließt das Gas direkt aus dem Eichgasbehälter in den Analysator und von dort in die Außenluft.

Die Durchführung einer Messung ist im Prinzip ebenfalls einfach und besteht aus den folgenden Schritten:

1. Eichung des Gasanalysators,
2. Definition und Vorbereitung der kennzeichnenden Parameter einer Messung,
3. Steuerung der Messung und Handhabung der Meßwerte.

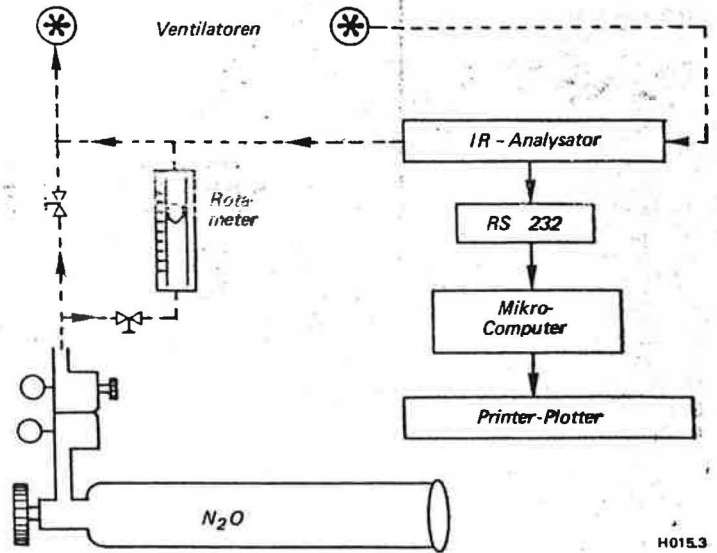


Bild 3: Prinzipskizze des Meßsystems

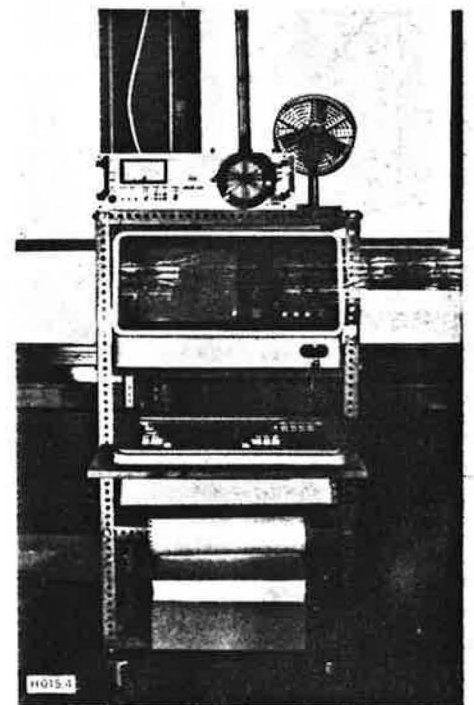


Bild 4: Foto des Meßstands (oben: Analysator mit Interface, Rotameter, Ventilator; Mitte: Mikrocomputer, Tastatur, Drucker; unten: Papierversorgung; hinten: Tracergasflasche)

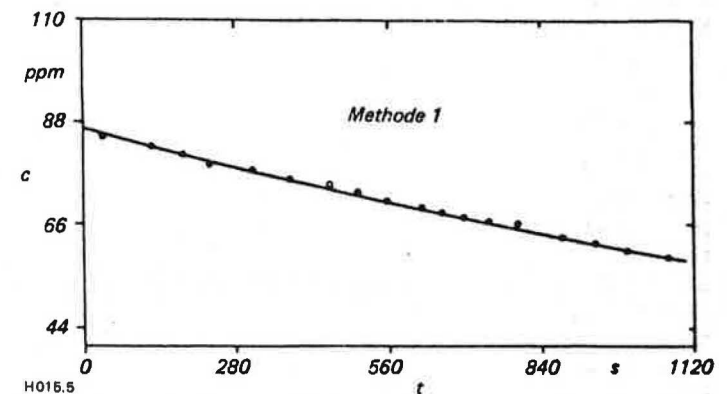
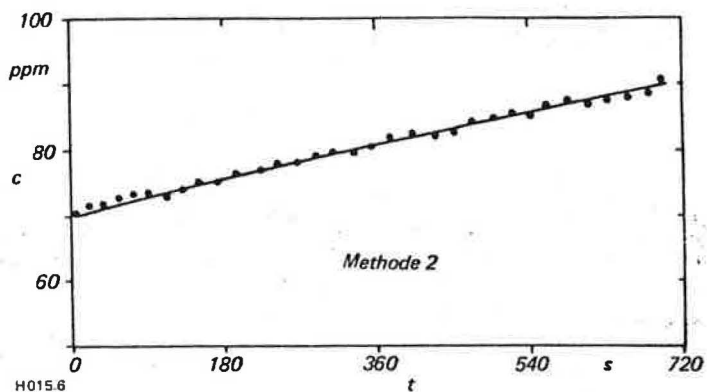
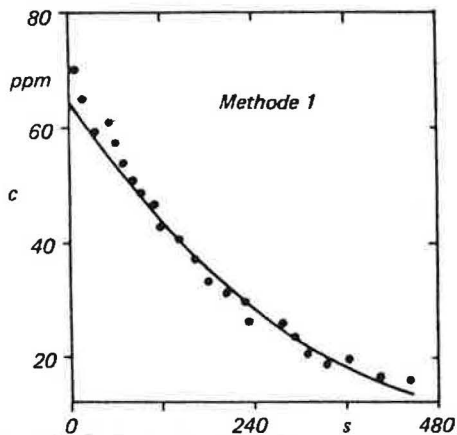


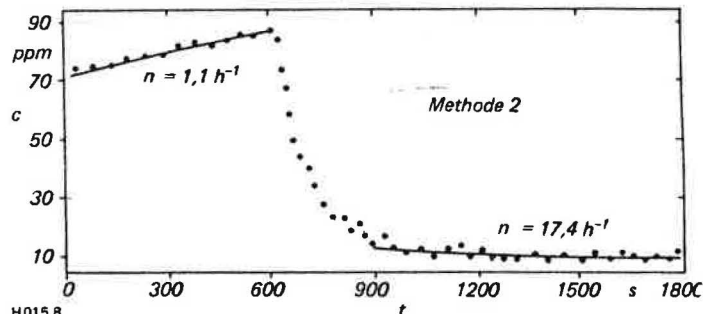
Bild 5: Konzentrationsabfall bei einer Messung zum Fall (a) mit Methode 1;  $n = 1,30 \pm 0,03 \text{ h}^{-1}$  (Meßwerte: Punkte, Rechnung: Linie)



H015.6  
Bild 6: Konzentrationsanstieg bei einer Messung zum Fall (a) mit Methode 2;  $n = 1,15 \pm 0,13 \text{ h}^{-1}$  (Meßwerte: Punkte, Rechnung: Linie)



H015.7  
Bild 7: Rascher Konzentrationsabfall bei einer Messung zum Fall (b) mit Methode 1;  $n = 12,7 \pm 0,3 \text{ h}^{-1}$  (Meßwerte: Punkte, Rechnung: Linie)



H015.8  
Bild 8: Konzentrationsverlauf bei einer Messung zur Kombination der Fälle (a) und (c) mit Methode 2 (Meßwerte: Punkte, Rechnung: Linien). Im Zeitintervall [600 s, 900 s] steigt die Luftwechselzahl von  $n = 1,1 \text{ h}^{-1}$  auf  $n = 17,4 \text{ h}^{-1}$

Zur Unterstützung dieser drei Vorgänge sind Mikrocomputerprogramme entwickelt worden [9]. Das Programm SIOINT aktiviert das serielle Input-Output-Interface zwischen dem Gasanalysator und dem Mikrocomputer und dient sowohl zur Eichung als auch bei der Messung von Spurengaskonzentrationen. Die Meßwerte werden wahlweise alle 0,2 s oder 2 s auf dem Bildschirm angezeigt. Mit den Programmen CONCAL und ERROR werden für die als wahrscheinlich angenommene Meßbedingung Konzentrationsverlauf und Meßfehler als Funktion der Randbedingungen bestimmt. Im Programm MEASMT werden alle notwendigen Variablen und Verfahrensparameter einer Messung und ihrer Auswertung in den Mikrocomputer eingegeben. Das Programm erstellt dann auf einer Diskette einen Datensatz, auf dem die Parameter der Messung und die eigentlichen Meßwerte abgelegt werden.

Es wurden zwei Arten der Meßwertfassung realisiert: Zeitabhängige und meßwertabhängige Datensammlung. „Zeitab-

hängig“ bedeutet, daß die Meßwerte in regelmäßigen Zeitabständen registriert und abgespeichert werden. Bei der „meßwertabhängigen“ Datenerfassung erfolgt eine Datenspeicherung nur, falls der entsprechende Wert vom vorhergehenden signifikant abweicht. Hierdurch wird ohne Verlust wesentlicher Information Speicherplatz gespart.

Sämtliche Programme sind benutzerfreundlich angelegt und verfügen über einen interaktiven Teil zur Eingabe der erforderlichen Variablen und Steuerungsparameter über die Rechartastatur. Nach vollendeter Eingabe laufen die Programme automatisch ab, und die Ergebnisse erscheinen auf dem Rechnerbildschirm oder als Druckerausgabe. Sie umfassen Tabellen und grafische Darstellungen von  $C(t)$ .

### Datenauswertung

Die Datenauswertung erfolgt entweder unmittelbar nach einer Messung oder zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt durch Aufruf des entsprechenden Datenfiles. Der erste Fall wird durch das Programm MEASMT abgedeckt, wenn ein dafür vorgesehener Kontrollparameter entsprechend gesetzt wird. Der zweite Fall erfordert ein eigenes Programm, EVALTN, das die Auswertungsverfahren von MEASMT umfaßt. Zusätzlich ist man mit EVALTN in der Lage, das Auswertungsverfahren auf definierte Untermengen der gesamten Zeitreihe zu beschränken. Auf diese Weise können Meßzeiträume mit offensichtlich irrigen Werten oder unter stark zeitveränderlichen Bedingungen — wie sie z.B. in bewohnten Räumen bei Öffnung von Fenstern auftreten (s. Bild 8) — aus der Analyse ausgeblendet werden.

Die Grundlage des Auswertungsverfahrens ist die Anpassung der Exponentialfunktion:

$$C(t) = A_0 + A_1 \cdot \exp(-A_2 \cdot t) \quad (14)$$

an die gemessenen Konzentrationen.  $A_0$ ,  $A_1$  und  $A_2$  sind diejenigen Zahlenwerte, die den Ausdruck (14) mit der Methode der minimalen quadratischen Abweichung an die Meßdaten annähern. Vergleich der Beziehungen (14), (6) und (5) liefert:

$$A_0 = F/Q \quad (15)$$

$$A_1 = C_0 - F/Q \quad (16)$$

$$A_2 = n \quad (17)$$

Der asymptotische Wert  $A_0$  verschwindet bei Methode 1, und die Luftwechselzahl  $n$  ist eindeutig durch  $A_2$  bestimmt. Bei der Methode 2 kann  $n$  jedoch zumindest aus den beiden Gln. (15) und (17) wegen (1) voneinander unabhängig bestimmt werden. Diese Dualität bei der Bestimmung von  $n$  stellt einen guten Test für die Glaubwürdigkeit von Resultaten dar.

In einem nicht sehr luftdichten Laborraum ( $V = 42 \pm 2 \text{ m}^3$ ) wurden unter winterlichen Bedingungen zu Testzwecken für drei verschiedene Fälle zahlreiche Luftwechsellmessungen durchgeführt [9]:

- (a) Tür und Fenster geschlossen ( $0,5 \leq n \text{ (h}^{-1}\text{)} \leq 1,4$ )
- (b) Tür offen, Fenster geschlossen ( $2,4 \leq n \text{ (h}^{-1}\text{)} \leq 18,0$ )
- (c) Tür geschlossen, Fenster gekippt ( $6,2 \leq n \text{ (h}^{-1}\text{)} \leq 23,2$ ).

Die rechts eingeklammerten Zahlen beschreiben den Bereich der im jeweiligen Fall beobachteten  $n$ -Werte. Deren breite Streuung wird variierenden meteorologischen Parametern zugeschrieben. Sie sind im Kontext dieser Arbeit nicht weiter untersucht worden.

### Diskussion von Testmessungen

Die Bilder 5 und 6 zeigen zwei Konzentrationsmessungen zum Fall (a) nach Methode 1 (Bild 5) und Methode 2 (Bild 6).

Der Konzentrationsabfall in *Bild 5* wird durch die Näherungsfunktion sehr gut wiedergegeben und führt zu einem entsprechend kleinen Fehler der Luftwechselzahl ( $n = 1,30 \pm 0,03 \text{ h}^{-1}$ ). Wenn unter ähnlichen experimentellen Bedingungen ein konstanter Injektionsstrom des Tracers von  $F = 8,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  fließt, dann nimmt die Konzentration mit der Zeit zu und folgt ebenfalls ziemlich gut der entsprechenden Approximationsfunktion (*Bild 6*). Die Luftwechselzahl wird aus Gl. (17) bestimmt und ergibt einen etwas größeren Fehler:  $n = 1,15 \pm 0,13 \text{ h}^{-1}$ . Bestimmt man  $n$  unabhängig davon aus Gl. (15), so erhält man in guter Übereinstimmung mit dem bereits vorhandenen Wert:  $n = 1,22 \text{ h}^{-1}$ .

Im Fall (b) wird zunächst im Meßraum eine gleichmäßige Spurengaskonzentration erzeugt. Dann wird eine Tür geöffnet, und die Konzentration fällt ab. Diese Situation ist in *Bild 7* für die Bedingungen eines raschen Luftwechsels dargestellt:  $n = 12,7 \pm 0,3 \text{ h}^{-1}$ . Die Konzentrationsfluktuationen um die Näherungsfunktion sind erheblich. Sie zeigen, daß zu Beginn der Messung die Zusammensetzung aus Außenluft und Raumluft nicht vollständig durchmischt ist, sondern aus großen Gasballen mit leicht unterschiedlichen Konzentrationen besteht. Aufgrund des schnellen Luftaustauschs werden schon wenige Minuten nach Beginn der Messungen sehr niedrige Konzentrationen erreicht. Dies reduziert die Genauigkeit der Datenauswertung. Deshalb wird unter solchen Bedingungen die Anwendung von Methode 2 anstelle der hier praktizierten Konzentrationsabfall-Methode 1 empfohlen.

Die Methode 2 wurde im Fall (b) eingesetzt, und typische Ergebnisse sind in *Bild 8* dokumentiert. Eine konstante Injektionsrate des Spurengases  $F = 7,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  wird bei geschlossenen Türen und Fenstern mit der Raumluft vermischt und die Konzentration steigt an. Dann wird ein Fenster gekippt und die Luftwechselzahl steigt rasch von  $n = 1,10 \pm 0,14 \text{ h}^{-1}$  während der ersten 600 s auf  $n = 17,4 \pm 1,3 \text{ h}^{-1}$  nach 900 s Meßzeit — ein Vorgang, der von einem plötzlichen Konzentrationsabfall im Zeitraum  $600 \text{ s} \leq t \leq 900 \text{ s}$  begleitet ist. Weil die Theorie der Datenanalyse auf konstanten Luftwechselzahlen beruht, kann dieser Übergangszeitraum nicht zur Auswertung herangezogen werden. Bestimmt man  $n$  im Bereich  $900 \text{ s} \leq t \leq 1800 \text{ s}$  aus Gl. (15) anstelle von Gl. (17), so ergibt sich  $n = 18,3 \text{ h}^{-1}$  — ein Wert innerhalb der erwarteten Fehlergrenzen.

## Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Ein mobiler Meßstand zur Bestimmung von Luftwechselzahlen wurde aufgebaut und für verschiedene Bedingungen in einem Laborraum getestet. Das Meßverfahren liefert einen schnellen Zugang zu Ergebnissen mit einer Vorbereitungsphase von ca. 15 min. und typischen Meßzeiträumen zwischen 15 und 30 min. Die Auswertung und Ausgabe der Resultate benötigt weniger als 5 min. Das experimentelle Verfahren zielt nicht auf die Erfassung langfristiger mittlerer Luftwechselzahlen, sondern auf kurz andauernde stichprobenartige Messungen.

Zwei Verfahren wurden untersucht: Die Konzentrationsabfall-Methode 1 und die Methode 2 konstanter Emission eines Spurengases. Methode 1 ist sehr gut zur Erfassung kleiner  $n$ -Werte geeignet (z.B.  $n \leq 6 \text{ h}^{-1}$ ) während Methode 2 für größere  $n$ -Werte besser anwendbar ist, da zu rascher Konzentrationsabfall und dementsprechend kurze Meßperioden durch eine passend dimensionierte Injektion von Tracergas vermieden wird. Als zusätzlicher Vorteil dieser Methode können die  $n$ -Werte auf zwei voneinander unabhängige Weisen ermittelt werden und gestatten durch ihren Vergleich eine Aussage über die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse.

Der wesentliche Fortschritt beim Einsatz dieser Meßverfahren liegt in der Verwendung eines Mikrocomputers. Mit seiner

Hilfe können die folgenden Aufgaben kurzzeitig und genau bewältigt werden:

- ▶ Unterstützung bei der Vorbereitung einer Messung. Durchführung der Eichung; Festlegung von Anfangskonzentration, Meßzeit und evtl. Injektionsvolumenstrom.
- ▶ Kontrolle der Messung (Takt der Meßdatenerfassung, Abbruchkriterium für Messungen).
- ▶ Automatische Anzeige, grafische Darstellung und Dokumentation der Parameter des Meßvorgangs und der Meßwerte.
- ▶ Unmittelbare bzw. schnelle Auswertung der Messungen mit vollständiger Darstellung der Eingangsparameter und Resultate. Bei Methode 2 erfordert die Auswertung ohnehin ein numerisches Verfahren.
- ▶ Durchführung der theoretischen Fehlerrechnung sowie statistischer Berechnungen.
- ▶ Auswertung evtl. reduzierter Datenmengen beim Auftreten von Störungen innerhalb von Zeitreihen.

Darüber hinaus verfügt man mit einem Mikrocomputer über die Möglichkeit, auch kompliziertere Meß- und Auswertungsverfahren anzuwenden, wie sie z.B. für die Meßmethode mit konstanter Konzentration oder für die Bestimmung des interzonalen Luftaustauschs zwischen verschiedenen Räumen erforderlich sind. Außerdem lassen sich mit ihm Korrelationsberechnungen über den Zusammenhang des Luftwechsels mit meteorologischen und benutzerspezifischen Eigenschaften schnell und ohne großen Zeitaufwand durchführen. Zusammenfassend läßt sich daher feststellen, daß die Untersuchung des Luftwechsels mit traditionellen Methoden (Konzentrationsabfall) vom Einsatz eines Mikrocomputers profitiert, kompliziertere Methoden jedoch die Anwendung von Mikrocomputern geradezu erzwingen. Der Fortschritt beim Einsatz des Mikrocomputers bei dieser Meßtechnik liegt deshalb sowohl in der Erleichterung und Standardisierung des üblichen Verfahrens wie auch in deren Möglichkeit zur Erweiterung. [H 015]

## Literaturangaben

- [1] IEA Program Plan: Air infiltration in buildings. Unveröffentlichte Studie, 1978.
- [2] Heidt, F. D., F. Haberdau, L. Trepte: Impact of air infiltration and ventilation on energy losses of buildings. In: Fernandes, E., Woods, J. E., Faist, A. P. (Hrsg.): Building Energy Management, 1981, S. 201/14.
- [3] Huber, G., u. H. U. Wanner: Raumluftqualität und minimale Lüftungsraten. Gesundheits-Ingenieur 103 (1982), S. 207/10.
- [4] Erhorn, H., u. K. Gertis: Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel? Gesundheits-Ingenieur 107 (1986), S. 12/14 und 71/76.
- [5] Liddament, M., u. C. Thompson: Techniques and instrumentation for the measurement of air infiltration in buildings. Air infiltration Centre, Technical Note 10, 1983.
- [6] Wegner, J.: Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels in ausgeführten Wohnungen, die mit sehr fugendichten Fenstern ausgestattet sind. Gesundheits-Ingenieur 104 (1983), S. 1/5.
- [7] Shaw, C. Y.: The effect of tracer gas on the accuracy of air change measurements in buildings. ASHRAE transactions, vol. 90, part 1A, 1984, p. 212/25.
- [8] H. Maihak AG, UNOR: Physikalische und meßtechnische Eigenschaften des nichtdispersiven Einstrahl-Infrarot-Fotometers. Technische Informationsbrochure der Maihak AG, Semperstr. 38, 2000 Hamburg.
- [9] Werner, H.: Computergesteuerter Betrieb eines Infrarot-Gasanalytators zur Messung von Gasaustauschraten. Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität-GH Siegen, 1984.