

Praktische Luftwechsellermittlung

Automatisierte Meßwerterfassung des Raumlufwechsels
unter verschiedenen Strömungsbedingungen im Raum – 1. Teil

Der folgende Beitrag gibt eine Beschreibung der Tracer-Meßmethode zur Ermittlung des Luftwechsels in Räumen. Die unterschiedlichen Methoden des Tracer-Eintrages werden aufgeführt und bewertet.

Schwerpunkt ist die physikalisch-mathematische Beschreibung der zeitlichen Konzentrationsänderung des Tracers, die die Berechnung einer Luftwechselzahl n ermöglicht.

Verschiedene Auswerteverfahren werden vorgestellt und bewertet. Die bisher in der Literatur nicht beachtete Empfindlichkeit der Luftwechselzahl n führte zur Ausarbeitung eines iterativen Berechnungsverfahrens.

In einem zweiten Teil wird anhand durchgeführter Untersuchungen die automatisierte Erfassung des Raumlufwechsels unter verschiedenen Strömungsbedingungen im Raum beschrieben.

Dr.-Ing. W. Lobeck und Dipl.-Ing. F. Masuhr,
Bauakademie der DDR,
Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik,
Berlin

Als Kriterium für die Beurteilung der Raumlufqualität wird heute immer noch der sogenannte „Pettenkofer-Maßstab“ herangezogen. Hierbei wird der CO_2 -Gehalt der Raumluf zur Beurteilung ihrer Qualität genutzt. Max von Pettenkofer [3] legte als Grenzwert für eine hygienisch unbedenkliche Raumluf einen CO_2 -Gehalt von 0,1 Vol.-% fest. Dabei wird angenommen, daß die Konzentration an Geruchsstoffen und Luftverunreinigungen der CO_2 -Konzentration proportional sind. Infolge der veränderten Nutzungsbedingungen und -gewohnheiten (höhere Wasserdampf-Konzentrationen durch Bad und Küche, Schadstoffemission aus Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen, Reinigungs-, Pflege- und Desinfektionsmitteln) hat sich die Schadstoffbelastung der Innenraumluf insgesamt erhöht [1; 2]. Für die einzelnen Schadstoffe sind maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) vorgeschrieben, die

Formelzeichen

$C(t)$	Tracergaskonzentration im Kontrollraum (ppm)
C_A	Tracergaskonzentration in der Außenluft (ppm)
C_0	Startwert aus der Konzentrationsverteilung = $C(t=0)$
Q_A	Außenluftvolumenstrom ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
V	Volumen des Kontrollraumes (m^3)
n	Luftwechselzahl (h^{-1})
t	Zeit (s)

nicht überschritten werden dürfen. In diesem Zusammenhang ist der MAK-Wert von CO_2 nur einer von mehreren. Die Schadstoffverdünnung durch Lüftung muß in der Intensität erfolgen, die gewährleistet, daß der MAK-Wert keines der vorhandenen Schadstoffe erreicht bzw. überschritten wird. In Europa wird für Wohngebäude auf eine Außenluft rate von $Q_A = 20$ bis $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und Person orientiert. Zum Nachweis dieser Außenluft rate kann der Raumlufwechsel n herangezogen werden. Der Raumlufwechsel n ist das Verhältnis von Außenluftvolumenstrom zu Raumvolumen, d.h.

$$n = \frac{Q_A}{V_R}$$

Tracergas-Meßmethode

Eine Methode, den Luftaustausch in Räumen zu ermitteln, ist die sogenannte Tracergas-Meßmethode. Sie wurde bereits 1858 von Max von Pettenkofer benutzt, um Rückschlüsse auf den Luftaustausch in Räumen ziehen zu können. Grundsätzlich werden drei verschiedene Vorgehensweisen dabei unterschieden:

Konzentrationsabfall-Methode

Bei dieser Methode wird ein geeignetes Spurengas in den Kontrollraum eingebracht und die Konzentrationsabnahme über die Zeit gemessen. Diese Konzentrations-Zeitmeßwerte werden mathematisch ausgewertet. Voraussetzung für eine Messung nach dieser Methode ist die Annahme eines stationären Zustandes, d.h., es wird eine Tracersättigung der Raumumschließungsflächen Möbel, Raumtextilien usw. vorausgesetzt. Die Tracerkonzentrationsabnahme kommt allein durch den Abtransport mit der Raumluf zustande.

Methode des konstanten Tracergas-Eintrags

Der Raumluf wird über den Meßzeitraum eine konstante Tracergas-Menge zugeführt. Dieser gleichbleibende Tracergas-Volumenstrom wird bei der mathematischen Auswertung berücksichtigt. Die Aufnahme des Konzentrationsverlaufs erfolgt analog der Darstellung im obigen Abschnitt. Der Vorteil dieser Methode gegenüber der Konzentrationsabfallmethode besteht darin, daß sich nach einer gewissen Anlaufzeit ein stationärer Zustand einstellt.

Methode der konstanten Tracergas-Konzentration

Durch eine geeignete Regelungseinrichtung wird die Tracerkonzentration im zu untersuchenden Raum konstant gehalten. Die Zuflußmenge des Spurengases je Zeiteinheit ist ein Maß für den Luftaustausch. Die Vorgehensweise ist technisch sehr aufwendig.

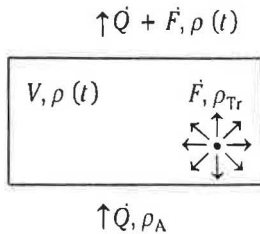
Mathematisch-physikalische Modellierung des Luftwechsels in Räumen

Zwischen dem effektiven Rauminhalt eines Gebäudes oder Gebäudeteils V und dem mit der Umgebung ausgetauschten Luftvolumenstrom Q besteht die integrale Beziehung

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

Der Proportionalitätsfaktor n gibt an, wie oft die Luft im Gebäude bzw. Gebäudeteil erneuert wurde.

Die Massenbilanz an einem Kontrollvolumen liefert eine Differentialgleichung



mit

$$V \frac{dC(t)}{dt} = \dot{Q} (C_A - C(t)) + \dot{F} (1 - C(t)) \quad (2)$$

$$\text{mit } C(t) = \frac{V_{Tr}(t)}{V}, \quad C_A = \frac{\dot{Q}_{Tr}}{\dot{Q}},$$

die sich mit Gl. (1) als eine Bestimmungsgleichung für die Luftwechselzahl n schreiben läßt.

$$\frac{dC(t)}{dt} = n \left(C_A + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} - C(t) \left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} \right) \right) \quad (3)$$

Damit ist eine Möglichkeit gegeben, aus der zeitlichen Änderung der Konzentration eines Spurengases den Luftaustausch (die Luftwechselzahl n) zu berechnen. Für die Differentialgleichung (3) läßt sich für $n = \text{konst}$ im Meßzeitraum die allgemeine Lösung angeben:

$$C(t) = \frac{C_A + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} - \frac{C_A + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} - \left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} \right) \cdot C_0}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} e^{-n \left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} \right) t} \quad (4)$$

Aus Gl. (4) können Spezialfälle abgeleitet werden:

I. ● Im Zuluftstrom \dot{Q} sei kein Tracergas vorhanden.

● Im Raum existiert keine Tracergasquelle, bei Meßbeginn ($t = 0$) liegt eine Anfangskonzentration C_0 vor.

$$C_A = 0$$

$$\dot{F} = 0$$

Aus Gl. (4) folgt damit

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-n \cdot t}$$

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

II. ● Im Zuluftstrom \dot{Q} sei Tracergas vorhanden.

● Im Raum existiert keine Tracergasquelle, bei Meßbeginn ($t = 0$) liegt eine Anfangskonzentration C_0 vor.

$$C_A \neq 0$$

$$\dot{F} = 0$$

Aus Gleichung (4) folgt damit

$$C(t) = C_A - (C_A - C_0) \cdot e^{-n t}$$

$$n = \frac{1}{t} \ln \frac{C_A - C_0}{C_A - C(t)} \quad n = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{C_A - C(t)}{C_A - C(t + \Delta t)} \quad (7)$$

III. ● Im Zuluftstrom \dot{Q} ist kein Tracergas vorhanden.

● Im Raum existiert eine kontinuierliche Tracergasquelle bei Meßbeginn ($t = 0$) sei $C_0 = 0$

$$\dot{F} \neq 0$$

$$C_A = 0$$

Aus Gleichung (4) folgt damit

$$C(t) = \frac{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} - \frac{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} e^{-\left(n + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}\right)t} \quad (8)$$

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}\right)t} \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} C(t)} \right] \quad (9)$$

Mit $\dot{F} \ll \dot{Q}$ ergibt sich

$$n = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{F}} C(t)} \right] \quad (10)$$

Zu beachten ist, daß für $t \rightarrow \infty$ ein Grenzwert C_∞ existiert

$$C_\infty = \frac{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} \quad (11)$$

über den auch die Luftwechselzahl n berechnet werden kann.

IV. ● Im Zuluftstrom ist Tracergas vorhanden.

● Im Raum existiert eine kontinuierliche Tracergasquelle, bei Meßbeginn ($t = 0$) liegt eine Anfangskonzentration C_0 vor.

$$C_A \neq 0$$

$$\dot{F} \neq 0$$

Die vollständige Gleichung (4) liefert für die Luftwechselzahl n

$$\ln \left\{ \frac{C_A + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}} (1 - C_A)} - \frac{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} C(t)}{\frac{\dot{F}}{\dot{Q}} (1 - C_A)} \right\} = -n \left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} \right) t \quad (12)$$

Eine einfachere Schreibweise ist möglich, wenn

$$C(t \rightarrow \infty) = C_\infty = \frac{C_A + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}}{1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}}} \quad (13)$$

eingeführt wird.

Damit läßt sich Gleichung (4) schreiben

$$C(t) = C_\infty - (C_\infty - C_0) e^{-n \left(1 + \frac{\dot{F}}{\dot{Q}} \right) t} \quad (14) \quad 969$$

Konzentrationsmessungen und deren Bewertung

Die ermittelten Beziehungen zwischen der Konzentration $C(t)$ eines künstlich eingebrachten Tracergases und der Luftwechselzahl n gibt die Möglichkeit, aus einfachen Konzentrationsmessungen einen Luftwechsel zu berechnen. Das mathematisch-physikalische Modell beinhaltet bestimmte Forderungen, die bei der praktischen Messung möglichst gut erfüllt sein müssen.

1. Gute Mischung des Tracergases mit der Raumluft im Gebäude oder Gebäudeteil.
2. Keine Adsorption des Tracergases durch Einrichtungsgegenstände oder die Bauhülle.

Ob diese Forderungen erfüllt sind, ist aus den Meßkurven zu entnehmen. Um qualitative Einschätzungen einigermaßen sicher vornehmen zu können, wurden umfangreiche experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt, die eine Anzahl von Bewertungskriterien ergeben, mit denen praktische Messungen beurteilt werden können.

Auswerteverfahren

Da die Luftwechselzahl n nur indirekt aus den zeitlichen Konzentrationsverteilungen berechnet werden kann, ist bei der Wahl der Auswerteverfahren mit großer Sorgfalt vorzugehen. Eine einfache Berechnung der Regressionskurve, die die Meßwerte so genau wie möglich nachbildet, ist in erster Linie für die Ermittlung von Konzentrationen des Tracergases außerhalb des Meßzeitraumes geeignet. Der Fehler bei der Berechnung einer Luftwechselzahl n kann dabei sehr groß werden.

Im folgenden sollen verschiedene Auswerteverfahren untersucht werden.

Mittelwertbildung

Nach Gleichung (7) gilt

$$n_i = \frac{1}{t_i} \ln \left[\frac{C_A - C_0}{C_A - C(t)} \right]$$

Voraussetzung für diese Art der Auswertung ist, daß der asymptotische Wert $C = C_A$ bekannt ist. Da der CO_2 -Gehalt (bei CO_2 als Tracergas) der Außenluft kaum schwankt, kann C_A in einer Einzelmessung bestimmt werden.

C_0 ist der subjektiv gewählte Anfangswert aus der Konzentrationsabfall-Kurve.

$C(t_i)$ ist neben dem Meßfehler noch von anderen äußeren Bedingungen abhängig.

a) Abweichungen, die durch wirkliche Luftwechseländerungen im Meßzeitraum bedingt sind.

b) Abweichungen, die durch schlechte Durchmischung von Raumluft und Tracergas entstehen.

Lineare Regression $y = nx$

Für die Konzentrationsabfall-Methode gilt bei einem Tracergasanteil C_A in der Zuluft und einem Anfangswert C_0 nach Gl. (7)

$$C(t) = C_A - (C_A - C_0) e^{-nt}$$

$$n \cdot t = \ln \left[\frac{C_0 - C_A}{C(t) - C_A} \right] = C^*(t)$$

Für n ergibt sich nach der Methode der kleinsten Quadrate

$$\bar{n} = \frac{\sum C^*(t_i) \cdot t_i}{\sum t_i^2}$$

Lineare Regression $y = b + ax$

Gleichung (7) läßt sich in die Form bringen

$$\ln(C_0 - C_A) - \ln(C(t) - C_A) = n \cdot t$$

Damit folgt

$$-\ln(C(t) - C_A) = -\ln(C_0 - C_A) + n t \quad (15)$$

und

$$y = C^*(t) = -\ln(C(t) - C_0)$$

$$b = -\ln(C_0 - C_A)$$

$$a = n \quad (16)$$

Für dieses Auswerteverfahren muß C_A bekannt sein. C_0 wird aus b ermittelt

$$C_0 = C_A + e^{-b} \quad (17)$$

Exponentielle Regression $y = a \cdot b^x$

Gleichung (7) in diese Form gebracht, ergibt

$$(C(t) - C_A) = (C_0 - C_A) (e^{-n})^t \quad (18)$$

Damit folgt

$$y = C^*(t) = C(t) - C_A$$

$$a = C_0 - C_A$$

$$b = e^{-n}$$

C_A muß bekannt sein; C_0 wird aus a berechnet.

$$C_0 = a + C_A$$

Die Luftwechselzahl n wird aus b bestimmt.

$$n = -\ln b \quad (19)$$

Exponentielle Regression $y = k - a \cdot b^x$

$$C(t) = C_A - (C_A - C_0) (e^{-n})^t \quad (20)$$

Das führt zu folgenden Beziehungen

$$k = C_A$$

$$a = C_A - C_0 \quad \text{und damit } C_0 = k - a$$

$$b = e^{-n}$$

$$n = -\ln b$$

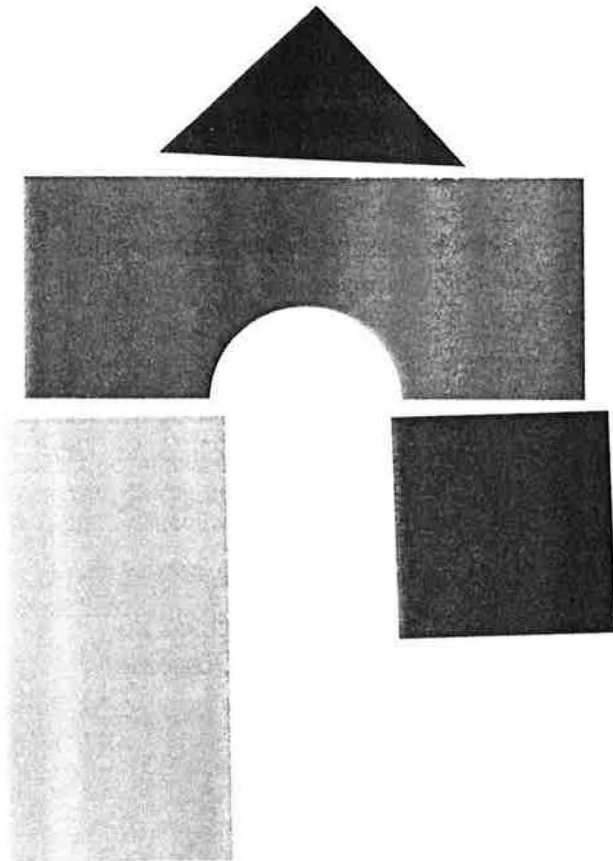
Die nach diesem Verfahren berechnete Luftwechselzahl n ist sehr ungenau, da sich die Werte C_0 und C_A aus den Koeffizienten ergeben und selbst bei Kenntnis keinen Einfluß auf den n -Wert haben.

Diskussion des Auswerteverfahrens nach [4]

Für konstanten Tracereintrag und $C_0 = C_A$ gilt nach Gleichung (4)

$$C(t) = \frac{n C_A + \frac{\dot{F}}{V}}{n + \frac{\dot{F}}{V}} - \frac{\frac{\dot{F}}{V} (1 - C_A)}{n + \frac{\dot{F}}{V}} \cdot e^{-\left(n + \frac{\dot{F}}{V}\right)t}$$

UNTERWEGS NACH EUROPA



UNTERNEHMER: AUF ZUR BAU

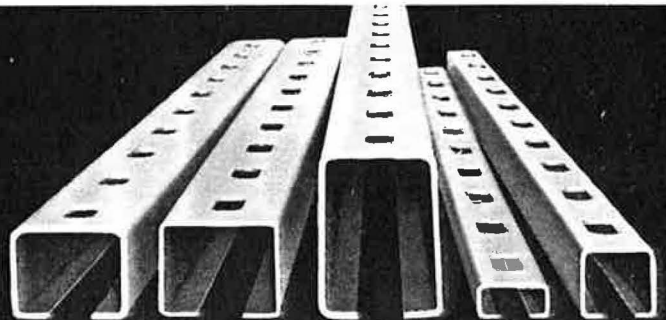
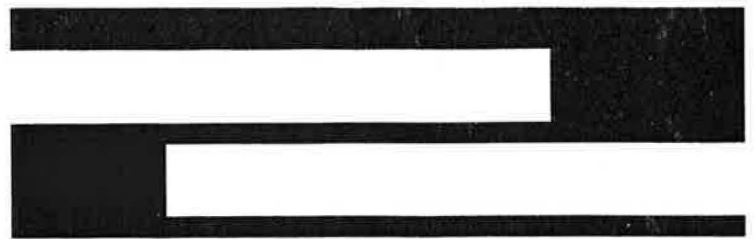
Hier sehen Sie zukunftsweisende Innovationen für das Bauen in Europa. Hier präsentieren über 1.300 Aussteller aus 24 Staaten ein breites Leistungsspektrum vom traditionellen Handwerk bis zu den Neuerungen volltechnisierter Bauabläufe. Hier sehen Sie, wie modernste Bautechniken gleichzeitig Rationalisierung und Qualität steigern. Die Bau '91 in München konzentriert an einem Ort die wichtigen bewährten und neuen Bauelemente, Werkstoffe und Verfahren. Die BAU in München - das Messeerlebnis mit Gewinnspiel. Europas größte Baufachmesse 1991.

**BAU
91**

**9. Internationale Fachmesse für
Baustoffe, Bausysteme, Bauerneuerung
München, 16. bis 22. Januar 1991**

Veranstalter: Münchener Messe- und Ausstellungsgesellschaft mbH, Postfach 12 10 09, D-8000 München 12
Telefon (089) 5107-0, Telex 5212086 amog d, Telefax (089) 5107-312, Bix *35075 #

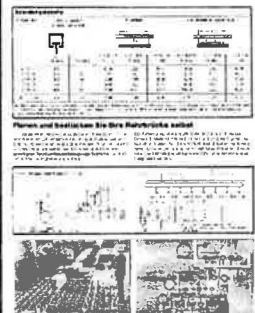
MESSE MÜNCHEN INTERNATIONAL



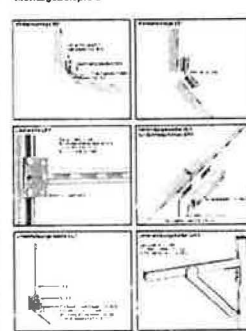
Das Sicherheits-System:
Rohrschellen und Befestigungsteile
aus einer Hand. Von ako.



Technische Daten - Schlitzschienen
Vortierung



Montagebeispiele



* Tyrodur- Schlitzschienen

- Belastungswerte von der Material- und Prüf-anstalt, Dortmund geprüft
- Schockgeprüft vom Amt für Zivilschutz, Bonn
- Feuerverzinkt und Edelstahlausführung
- Zul. Belastungen von 220 N - 4750 N bei einer Spannweite von 1,0 m

ako

Sachsenring 2-4 · D-5000 Köln 1 · Tel. (02 21) 33 03-0

Schicken Sie mir kostenlos und unverbindlich ☐ Exemplare des neuen 48-seitigen Gesamtkatalogs **ako Befestigungstechnik**

Mit Informationen über
Tyrodur-Befestigungssystem
DN 10-600
Tyrodur-Sprinkler- und Kälte-
rohrschellen
Brückenbefestigungen
Montagebeispiele / Prüfzeugnisse

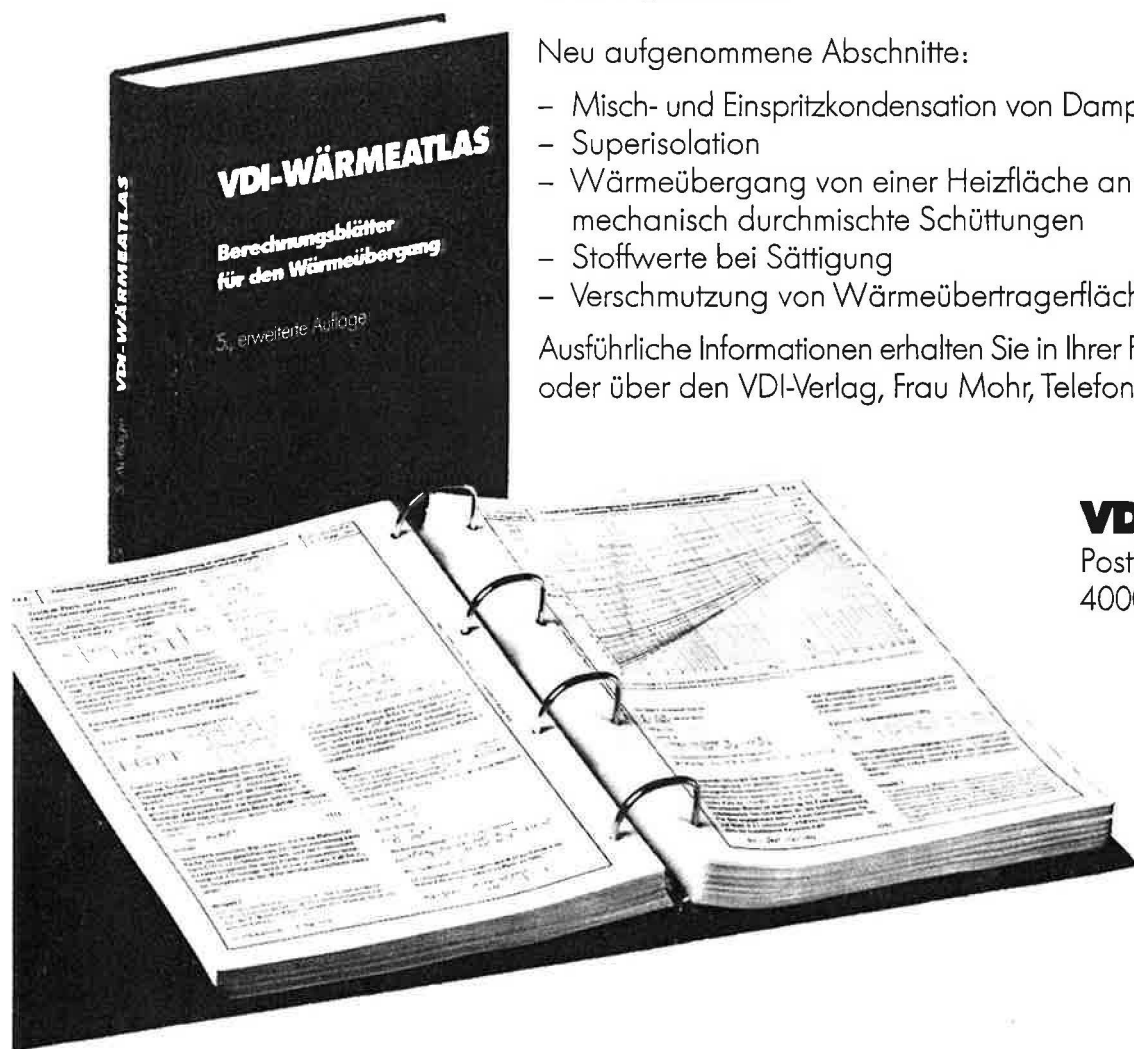
Name
Firma
Straße
Ort
Tel.

ako · Postfach 25 01 20 · D-5000 Köln 1

S

DAS STANDARDWERK FÜR WÄRMEÜBERGANGSBERECHNUNGEN:

Der VDI-Wärmeatlas ist erheblich erweitert worden. Diagramme, Tabellen, Programmabläufe und praxisbezogene Berechnungsbeispiele sind auf den aktuellen Stand gebracht.



Neu aufgenommene Abschnitte:

- Misch- und Einspritzkondensation von Dampf-Gas-Gemischen
- Superisolation
- Wärmeübergang von einer Heizfläche an ruhende oder mechanisch durchmischte Schüttungen
- Stoffwerte bei Sättigung
- Verschmutzung von Wärmeübertragerflächen

Ausführliche Informationen erhalten Sie in Ihrer Fachbuchhandlung oder über den VDI-Verlag, Frau Mohr, Telefon 02 11/61 88-126.

VDI VERLAG

Postfach 82 28
4000 Düsseldorf 1

Hrsg. VDI-Gesellschaft
Verfahrenstechnik und Chemie-
ingenieurwesen (GVC). 5., über-
arbeitete und erweiterte Auflage
1988. 900 Seiten, 824 Abb., 351
Tabellen. DIN A 4.

Loseblattausgabe DM 680,-
(VDI-Mitglieder DM 612,-)
ISBN 3-18-400760-X

Gebundene Ausgabe DM 640,-
(VDI-Mitglieder DM 576,-)
ISBN 3-18-400850-9

COUPON

Bitte einsenden an den
VDI-Verlag, Abt. VBW-B, Post-
fach 82 28, 4000 Düsseldorf 1
oder an ihre Buchhandlung.

JA, bitte senden Sie mir

— Expl. VDI-Wärmeatlas,
Loseblatt-Ausgabe zum
Preis von DM 680,-
(VDI-Mitgl. DM 612,-)*
ISBN 3-18-400760-X

— Expl. VDI-Wärmeatlas,
Gebundene Ausgabe
zum Preis vom DM 640,-
(VDI-Mitgl. DM 576,-)*
ISBN 3-18-400850-9

— Informationsmaterial

V 311

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Ort

VDI-Mitglieds-Nr.* (auch im Buchhandel)

Datum/Unterschrift

oder

$$C(t) - C_A = \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_A)}{n + \frac{\dot{F}}{V}} - \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_A)}{n + \frac{\dot{F}}{V}} e^{-\left(n + \frac{\dot{F}}{V}\right)t} \quad (21),$$

mit

$$k = \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_A)}{n + \frac{\dot{F}}{V}} \quad a = \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_A)}{n + \frac{\dot{F}}{V}}$$

$$b = e^{-n\left(1 + \frac{\dot{F}}{Q}\right)t} \quad \bar{C}(t) = C(t) - C_A$$

ergibt sich

$$\bar{C}(t) = k - a \cdot b^t \quad (22).$$

Für diese Art der Darstellung existieren Regressionsprogramme, mit denen Meßwerte angenähert dargestellt werden. Die ermittelten Ausgleichskurven sind geeignet, auch außerhalb des Meßzeitraumes Konzentrationen mit guter Genauigkeit anzugeben. Es ist jedoch nicht günstig, aus den Koeffizienten k , a und b bei Vorgabe von C_A und \dot{F} die Luftwechselzahl n zu bestimmen.

Selbst die Berechnung eines Mittelwertes aus den drei unterschiedlichen Luftwechselzahlen

$$n_k = \frac{1}{k} \left[\frac{\dot{F}}{V} (1 - k - C_A) \right]$$

$$n_a = \frac{1}{a} \left[\frac{\dot{F}}{V} (1 - a - C_A) \right]$$

$$n_b = -\left(\frac{\dot{F}}{V} + \ln b\right)$$

$$\bar{n} = \frac{1}{3} (n_k + n_a + n_b)$$

bietet keine Gewähr, der richtigen Luftwechselzahl n genügend nahezukommen. Die Genauigkeit der berechneten Luftwechselzahl n läßt sich nur iterativ erhöhen, d.h., eine der Größen \dot{F} oder C_A wird als gegeben betrachtet und aus den Koeffizienten a und b , n und C_A oder \dot{F} neu berechnet.

Daraus ergibt sich ein neuer Wert für k . Über eine erneute Regression mit den vorgegebenen Meßwerten werden neue Koeffizienten a und b berechnet.

Selbst für eine, durch die Iteration, nur kleine Änderung im Verlauf der Ausgleichskurve kann die Änderung der Luftwechselzahl n erheblich sein.

Beispielrechnung (s. Bild 1)

$$C_A = 300 \text{ ppm}$$

$$\dot{F} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{Zeitschritte } 1 \text{ min}$$

$$V = 42 \text{ m}^3$$

$$\bar{C}(t) = C(t) - C_A$$

Meßwerte

$C(t)$ [ppm]	t [min]
306	0
338	1
350	2
380	3
419	4
460	5
465	6
490	7
510	8
547	9
579	10

Die Luftwechselzahl n soll durch exponentielle Regression der Meßwerte bzw. durch Iteration bestimmt werden. Tracergaseintrag \dot{F} und CO_2 -Gehalt der Außenluft C_A sind konstant.

$$\bar{C}(t) = k - a \cdot b^t.$$

Iterationsschritte

1. n_1 gewählt
(günstig geschätzt oder aus einem Meßpunkt berechnet).
Aus diesen Angaben läßt sich ein Anfangswert k_1 berechnen

$$C_{A1} = C_A$$

$$k_1 = \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_{A1})}{n_1 + \frac{\dot{F}}{V}},$$

mit dem, für die oben gegebenen Meßwerte die Konstanten a_1 und b_1 ermittelt werden.

2. Im zweiten Iterationsschritt ergibt sich die Luftwechselzahl n_2 zu

$$n_2 = -60 \ln b_1 - \frac{\dot{F}}{V}$$

und mit dem daraus berechneten Koeffizienten

$$k_2 = \frac{\frac{\dot{F}}{V}(1 - C_{A1})}{n_2 + \frac{\dot{F}}{V}}$$

über eine erneute Regression die Konstanten a_2 und b_2 usw. Stimmen a_1 und a_{i+1} im Bereich einer festgelegten Fehler-schranke überein, wird die Iteration abgebrochen.

Für das obige Beispiel ergibt sich bei einem Startwert $n_1 = 2 \text{ h}^{-1}$ nach 253 Iterationen

$$\bar{C}(t) \approx 1,045 \cdot 10^{-4} - 1,045 \cdot 10^{-4} \cdot 0,970689^t.$$

Die Luftwechselzahl n berechnet sich nach Abbruch der Iteration zu

$$n \approx 1,785 \text{ h}^{-1}.$$

Das Verfahren iteriert auch bei Anfangswerten für die Luftwechselzahl n , die kleiner sind als der tatsächliche Wert, ausgenommen 0 und Werte < 0 . Die einfache exponentielle Regression der Meßwerte liefert für die Koeffizienten a , b und k

$$k \approx 7,28 \cdot 10^{-5}$$

$$a \approx 4,49 \cdot 10^{-5}$$

$$b \approx 9,06117 \cdot 10^{-1}.$$

Diese Ausgleichskurve, die die Meßwerte nach der Methode der kleinsten Quadrate erfaßt, liefert jedoch für die Luftwechselzahl n drei unterschiedliche Werte.

$$n_1 = -60 \cdot \ln b - \frac{F}{V} \approx 5,9 \text{ h}^{-1}$$

$$n_2 = \frac{F}{V} \cdot \frac{1-k}{k-C_A} \approx 4,49 \text{ h}^{-1}$$

$$n_3 = \frac{1}{a} \frac{F}{V} (1 - C_A - a) \approx 4,2 \text{ h}^{-1}$$

Die nach Gleichung (21) zu fordernde Gleichheit der Koeffizienten k und a kann die exponentielle Regression ohne Iteration nicht liefern. Trotz der relativ geringen Abweichung der Luftwechselzahlen n_1 , n_2 und n_3 untereinander ($\approx 15\%$ Abweichung von einem Mittelwert $\bar{n} = 4,8 \text{ h}^{-1}$) beträgt der Unterschied zur durch Iteration gefundenen Luftwechselzahl $n \approx 1,8$ mehr als 150%. Um mittels einfacher exponentieller Regression die tatsächliche Luftwechselzahl n einigermaßen genau berechnen zu können, müßten sehr viele Meßwerte über eine längere Meßdauer aufgenommen werden. Die Empfindlichkeit bei der Berechnung der Luftwechselzahl n zeigt sich deutlich darin, daß (auf das obige Beispiel bezogen) bei einem Unterschied der Koeffizienten a und k aus der einfachen exponentiellen Regression von $\Delta < 70\%$ die Abweichung der Luftwechselzahl n , von der aus durch Iteration berechneten, maximal 230% beträgt. In Bild 1 sind die Ausgleichskurven für das Rechenbeispiel aufgezeichnet. Die Unterschiede in den Kurvenverläufen machen die Probleme bei der Berechnung der Luftwechselzahl n deutlich. Bei einer automatisierten Meßwerterfassung und Berechnung der Luftwechselzahl aus einer größeren Zahl von Meßwerten im Meßzeitraum Δt ist das in [4] vorgestellte Auswerteverfahren (einfache exponentielle Regression $y = k - a \cdot b^t$) problematisch, da bei Abweichung von k und s untereinander eine Abschätzung der Luftwechselzahl n unmöglich erscheint.

Zusammenfassung

Wird eine automatische Meßwerterfassung angestrebt und eine anschließende Auswertung über Rechner vorgenommen, bieten sich drei Auswerteverfahren an:

- lineare Regression,
- exponentielle Regression bei genauer Erfassung von C_A ,
- exponentielle Regression mit Iteration.

Die Mittelwertbildung bewertet Fehler am Anfang der Meßkurve sehr hoch, so daß ihre Genauigkeit auch einen gewissen „Zufallscharakter“ hat. Da der Rechner nicht in der Lage ist, „schlechte“ Meßwerte ohne weiteres zu erkennen und zu selektieren, sind die genannten Regressionsverfahren vorzuziehen.

Bei der Berechnung von Ausgleichskurven aus einer Vielzahl von Meßwerten ist grundsätzlich zu beachten, daß damit lediglich im Rahmen einer gewissen Genauigkeit Aussagen über die gemessenen Größen außerhalb des betrachteten Meßbereichs gemacht werden können. Die verbreitete Verfahrensweise, aus den Kurvenparametern auf spezielle physikalische Größen zu schließen, die indirekt mit den gemessenen Größen zu tun haben, ist problematisch, wie das Rechenbeispiel zeigt. Speziell für die Berechnung der Luftwechselzahl n wurde eine Möglichkeit angegeben, wie durch Iteration die Genauigkeit erhöht werden kann. Der Vergleich auf verschiedene Art gewonnener Ausgleichskurven kann hilfreich sein bei einer Fehlerabschätzung.

Eine Aussage über die Art des Luftwechsels ist damit noch nicht möglich. Da für die Lüftung von Wohnungen Aussagen über den Außenluftwechsel gefordert sind, muß parallel zur Luftwechselmessung im Kontrollraum eine qualitative Einschätzung der Raum-

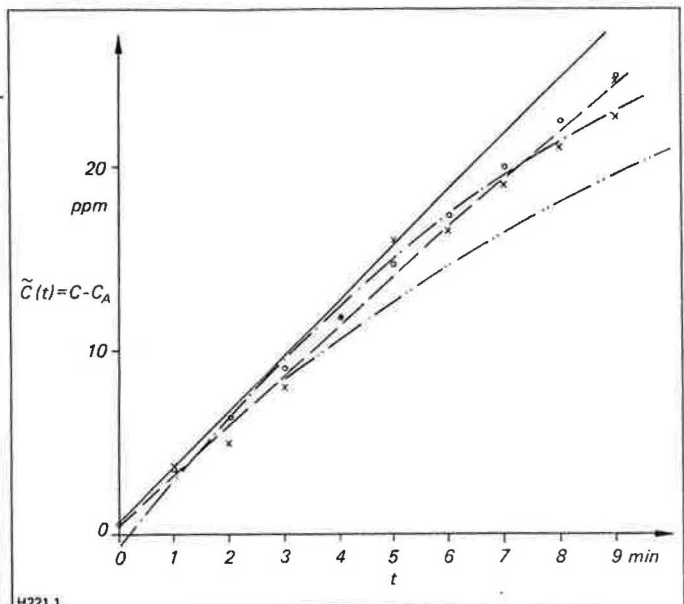


Bild 1: Vergleich verschiedener Auswerteverfahren

- x Meßwerte (siehe Tabelle)
- theoretischer Konzentrationsverlauf für $n = 0$
- - - Iteration bei festem F ($n \approx 1,785 \text{ h}^{-1}$) 253 Iterationen
- · - einfache exponentielle Regression der Meßwerte (C_A , C_0 und F freie Konstanten)
- - - mit dem aus -- berechneten Luftwechsel und den vorgegebenen Werten C_A und F berechneter Konzentrationsverlauf
- berechneter Konzentrationsverlauf für $n = 1,78 \text{ h}^{-1}$

strömung vorgenommen werden. Das kann bei Kenntnis bestimmter Außenbedingungen über die Berechnung der Gebäudeströmung oder über die qualitative Messung der Raumströmung erfolgen. Der Aufwand zur Ermittlung eines Außenluftwechsels kann damit erheblich steigen.

[H 221]

Literaturangaben

- [1] Wegner, J.: Schadstoffanfall, Luftwechsel in Wohnungen, freie Lüftung. Gesundheits-Ingenieur 105 (1984) Nr. 3.
- [2] Rosenkranz: Diskussion um die Raumluftqualität. Technik am Bau 17 (1986) Nr. 11.
- [3] Pettenkofer, M. v.: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München 1858.
- [4] Heidt, F.-D.: Fortschritte bei der Luftwechselmessung durch Mikrocomputereinsatz. HLH 38 (1987) Nr. 8, S. 391/95.