

Studie über Notwendigkeit und Zuverlässigkeit von Luftwechsel- und Luftvolumenstrommessungen

Hans-Dieter Schulze und Giselher Schuschke

Der Luftaustausch von Gebäuden oder Gebäudeteilen mit der Umgebung, ausgedrückt als Luftvolumenstrom, Luftwechselzahl oder Lüftungskoeffizient, ist in der Bauphysik noch immer eine problematische Kenngröße.

Die hygienische, energetische und bauphysikalische Bedeutung des Luftwechsels verlangt genaue Kenntnisse über sein Ausmaß. Theoretische Berechnungen aus physikalischen, meteorologischen und technischen Parametern bzw. Daten sind zwar in der Praxis üblich, können aber erfahrungsgemäß nur grobe Anhaltspunkte liefern, die den tatsächlichen Verhältnissen häufig wenig oder gar nicht entsprechen. An einigen Beispielen werden diesbezügliche Unsicherheiten, die sich sowohl in der Projektierung als auch in der Bauausführung finden, demonstriert. Messungen des Luftwechsels unter Praxisbedingungen sind demzufolge unerlässlich. Eine kritische Wertung des Meßmethodeninventars deckt aber auch hier eine Reihe von Fehlermöglichkeiten auf, deren unzulängliche Berücksichtigung zu falschen Ergebnissen und Schlußfolgerungen führen können.

1. Einleitung

Die Aufrechterhaltung optimaler klimatischer und luft-hygienischer Verhältnisse in Räumen setzt eine ständige Lüfterneuerung voraus. Diese allgemeine Forderung ist unumstritten. Meinungsverschiedenheiten ergeben sich jedoch, wenn die Größe des erforderlichen Luftwechsels festgelegt werden soll. Dabei konkurrieren nicht nur Maßnahmen zum Wärmeschutz und zur Energieeinsparung mit Forderungen, wie sie sich aus hygienischen Erkenntnissen, bauphysikalischen Grundregeln oder sicherheitstechnischen Aspekten bezüglich des Zuluftbedarfs ergeben (u. a. *Erhorn* 1986). Auch Unwägbarkeiten wie Bauausführung (Fugengröße, Dichtigkeit), meteorologische und orographische Parameter (thermische und strömungsbedingte Druckgradienten) sowie Nutzerverhalten (Nutzungsart, zeitliches Profil, Gewohnheiten) beeinflussen den tatsächlichen Luftwechsel in vielfältiger Weise (*Heidt* 1987) und lassen Projektvorgaben oftmals ebenso fragwürdig erscheinen wie Verallgemeinerungen.

Eine Überprüfung der realen „Frischlufzufuhr“ ist also im konkreten Fall aus ganz unterschiedlichen Gesichtspunkten wünschenswert oder erforderlich. Genaue Kenntnisse über Luftaustauschvorgänge werden um so

zwingender, je mehr den Luftverunreinigungen einschl. der Radon-Emanation in Innenräumen Aufmerksamkeit gewidmet wird, das Phänomen des „sick building syndroms“ nach einer Erklärung verlangt und das Kohlendioxid nicht mehr als Synonym für die Luftgüte schlechthin akzeptiert werden kann (*Fanger* 1988). Vor allem sind aber auch ökonomische Aspekte belangvoll, die Kalkulation der Energiebilanz setzt genaue Kenntnisse über die Größe des Lüftungskoeffizienten voraus. Während normalerweise der Wärmeverlust durch Lüftung bei 20% liegt, steigt in energieeffizienten Bauten der Anteil in Relation zu den Transmissionsverlusten, so daß in gut gedämmten Gebäuden die Proportionen sich umkehren (*Penman* 1980) und damit die Lüftungswärmeverluste zum Gütekriterium werden.

Erklärt sich hieraus die Notwendigkeit zur Messung vor Ort, so ist andererseits die Frage nach der Zuverlässigkeit der zur Verfügung stehenden Luftwechsel-Bestimmungsmethoden, der Meßtechnik überhaupt sowie der Prüfstandzertifikate zu stellen.

2. Luftvolumenstrommessungen

In Bauten, in denen Zu- oder Abluft kanalisiert strömen, bietet sich das Flügelrad-Anemometer für Luftvolumenstrommessungen an. Aus der angezeigten Luftgeschwindigkeit läßt sich unter Berücksichtigung des Rohrdurchmessers der zeitliche Durchsatz sofort errechnen. Um den verschiedenen geometrischen Formen der Kanalöffnungen Rechnung zu tragen, wurde von uns ein handelsübliches Flügelrad-Fernanemometer Nr. 27 (VEB Anemometerbau Dresden) in ein PVC-Rohr eingepaßt, auf dessen Rand eine quadratische, schaumgummibeschichtete Grundplatte aufgeschweißt ist. Der Luftstrom wird dadurch auf das Flügelrad gelenkt, ein seitliches Vorbeiströmen aber verhindert (*Bild 1*).

Die auf diese Weise einfach und zuverlässig durchführbaren Überprüfungen an Lufteintritts- oder Luftaustrittsöffnungen zwangsbelüfteter Bauwerke müßten routinemäßig für die Bauübergabe an den Nutzer gefordert werden, denn sie bringen u. U. Erstaunliches zu Tage. Messungen in Wohnungen ergaben, daß die Mindestaußenluftzufuhr in den seltensten Fällen Sollhöhe erreichte, besonders weil die Lamellen in den Durchlaßelementen ohne meßtechnische Nachprüfung einreguliert werden (*Schulze* 1933).

Eigene Kontrollen in einer orthopädischen Poliklinik ergaben, daß sämtliche physiotherapeutischen Einrichtungen

Dr. rer. nat. Hans-Dieter Schulze und Prof. Dr. sc. med. Giselher Schuschke, Institut für Allgemeine und Kommunale Hygiene der Medizinischen Akademie Magdeburg.

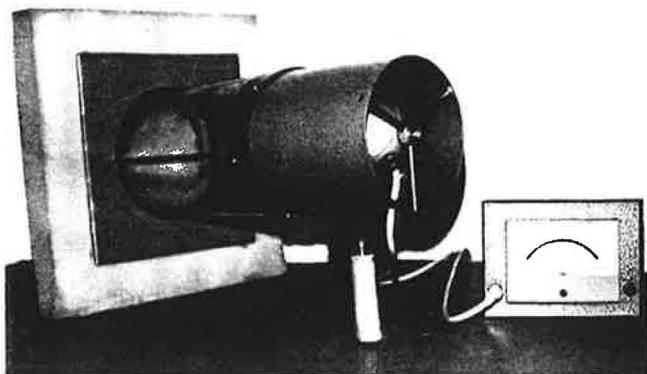


Bild 1. Flügelrad-Fernanemometer Nr. 27 (VEB Anemometerbau Dresden), modifiziert für Luftdurchsatzmessungen an Kanalöffnungen unterschiedlicher geometrischer Form.

gen und auch der Labor- und Röntgentrakt entgegen den Berechnungen laut Lüftungsprojekt völlig unzureichend belüftet wurden. Ähnlich waren die Befunde in einigen Bereichen des Küchen- und Lagertrakts eines Mensa-Neubaus. Auf der anderen Seite wurde unsinnig hoher Luftdurchsatz in einer Sanitäreinheit festgestellt, wobei Duschzelle und WC vom Luftstrom gar nicht erreicht werden, dafür aber im Vorraum am Waschbecken Luftgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s extreme Diskomfortbedingungen schaffen.

Obwohl die Meßtechnik unkompliziert und im Wirkungsprinzip leicht überschaubar ist, sind Fehlinterpretationen der Meßergebnisse nicht ausgeschlossen. Ein Fensterlüfter (Typ 2N 612) mit einer ausgewiesenen maximalen Förderleistung von 1100 m³/h, eingebaut in eine Tür, sollte in einem Klassenraum für die notwendige Lufterneuerung sorgen. Durch Veränderung der Schlitzbreite an der saugseitig angebrachten Schalldämmvorrichtung wurde ein Förderstrom von 600 m³/h eingestellt, was einem dreifachen Luftwechsel entsprochen hätte. Zur Gewährleistung einer Querströmung war ein Kippfenster geöffnet. Gemessen wurde der Luftdurchsatz an der vom Flur aus leichter zugänglichen Luftaustritts- oder Druckseite. Der über die Zeit verfolgte CO₂-Anstieg sowie Luftwechselbestimmungen mit Tracergas (s. u.) ergaben, daß die tatsächliche Außenlufrate nur ein Zehntel der erwarteten betragen kann. Mittels künstlichem Nebel konnte die Ursache für die Diskrepanz sichtbar gemacht werden: Der Lüfter saugt axial Luft von vorn an, die radial abströmt, während aus dem rückwärtigen Raum nur ein geringer Teilstrom, abhängig von den Strömungshindernissen, zum Anemometerwert beiträgt. Eine anschließende Strömungsmessung an der Saugseite ergab tatsächlich einen Luftdurchsatz von 85 m³/h, womit bei Berücksichtigung von Kurzschlußstrecken im Türbereich die aus der Luftwechselzahl berechnete Außenlufrate bestätigt wurde. Aufschlußreich war in dem Zusammenhang die Feststellung, daß auch bei Entfernen aller Strömungshindernisse nur 320 m³/h Luftdurchsatz erreicht wurden. Die Beispiele belegen, wie bereits im Meßansatz der Grundstein für Fehldeutungen gelegt sein kann und daß andererseits den vom Hersteller oder Projektant gelieferten Leistungsparametern mit Skepsis zu begegnen ist.

Auf dem Prüfstand gewonnene Kennziffern oder Leistungsparameter auf Praxisbedingungen zu übertragen, ist auch in anderer Hinsicht problematisch. Fenster mit einem speziellen Lüftungsschlitz im Kämpferbereich hatten in der Prüfkabine den Eignungstest bezüglich Luftdurchsatzmenge und Zugluftfreiheit bestanden. Nach dem Einbau im Schulgebäude konnten allerdings die Ergebnisse nicht bestätigt werden (Schulze 1987). Obwohl die Untersuchungen bei günstigen meteorologischen Voraussetzungen mit Temperaturdifferenzen von (25 bis 35) K zwischen innen und außen und bis zu 3 m/s Windgeschwindigkeit abliefen, betrug der gemessene Luftwechsel maximal 0,15 h⁻¹. Die daraus errechneten Außenlufraten in Höhe von 1,0 m³/h × Pers. erreichten nicht annähernd die in diesem Fall zu gewährleistenden 20 m³/h × Pers. Die Unwirksamkeit der Lüftungsslitze, die der normalerweise projektseitig kalkulierten Fugenlänge und -breite gleichzusetzen sind, ist auf die fehlende Querlüftung zurückzuführen. Zwecks Lärminderung sind die Türen mit Schaumgummi versehen und damit auch weitgehend luftdicht gemacht. Das Untersuchungsergebnis läßt sich auch dahingehend verallgemeinern, daß die Vorgabe eines bestimmten Fugendurchlaßkoeffizienten z.B. für Fensterkonstruktionen nicht nur wegen der zeitlichen Variabilität, d.h. Änderung durch Altern beispielsweise, fragwürdig ist.

3. Luftwechselbestimmung mit Indikatorgasen

Für die Untersuchung der oben geschilderten Zwangslüftung, aber vor allem für diffuse Luftaustauschvorgänge bietet sich die Indikatorgas-Technik an, die auf der Messung des zeitlichen Konzentrationsverlaufs von Spurengasen, die der zu wechselnden Luft zugemischt werden, beruht. Die am häufigsten angewendeten und meßtechnisch am besten beherrschbaren Varianten beruhen entweder auf der konstanten Emission des Indikatorgases oder auf der Messung des Konzentrationsabfalls. Als Indikatoren oder Tracer bietet sich auf den ersten Blick eine Reihe von Gasen an, die den grundsätzlichen Anforderungen zu genügen scheinen (Götting 1972), zumal der heutige Entwicklungsstand der Analysetechnik nur noch in speziellen Fällen ein limitierender Faktor ist.

Beim Vergleich verschiedener bewährter und zum Methodeninventar zu zählender Indikatorgase zeigt sich jedoch, daß unter identischen Versuchsbedingungen durchaus unterschiedliche Ergebnisse erhalten werden können, die eine zugestandene Toleranz von 10%, bedingt durch unterschiedliche Genauigkeit bei der Meßwerterfassung und Auswertetechnik, deutlich übersteigt.

3.1 Edelgase

Edelgase unterliegen Nebeneffekten am wenigsten, wie z. B. Adsorption oder Absorption. Ihr zeitlicher Konzentrationsabfall sollte somit ausschließlich dem Luftwechsel zugeschrieben sein, besonders wenn einem eventuellen Entmischen infolge von Dichteunterschieden entgegenwirkt wird. Können außerdem noch radioaktive Isotope

eingesetzt werden, entstehen bedeutende Vorteile durch Entfallen der Probenahme, leichte Adaption der vorhandenen Analysentechnik und nicht zuletzt in ökonomischer Hinsicht durch drastische Verminderung der benötigten Gasmengen, wenngleich die Radioaktivität das Einsatzspektrum begrenzt.

Von den theoretisch in Frage kommenden radioaktiven Isotopen der Edelgase genügt Krypton-85 den Anforderungen am besten, was seine Etablierung in der Praxis der Luftwechseluntersuchung seit mehr als 20 Jahren begründet (Beer 1975; Göttling 1972; Schulze 1980). Da weder die Halbwertszeit des Eigenzerfalls noch die natürliche Hintergrundstrahlung die Meßwerte entscheidend beeinflussen, bietet sich an, Kr-85 als Bezugsindikator zu benutzen. Von der Richtigkeit dieser Annahme überzeugten wir uns durch Messungen in fensterlosen zwangsentlüfteten Räumen, in denen der Luftvolumenstrom mittels Flügelrad-Anemometer an der Absaugöffnung exakt festgestellt werden konnte.

3.2 Lachgas (N_2O)

Als universell einsetzbarer Tracer, der nach heutigem Erkenntnisstand auch Untersuchungen in Anwesenheit von Personen im Raum gestattet, hat sich N_2O (Lachgas, Distickstoffmonoxid, Stickoxydul) in die Meßpraxis eingeführt, zumal seine breite Anwendung in der Anästhesie ständige Verfügbarkeit gewährleistet.

Bei Parallelmessungen, d. h. bei gleichzeitigem Einsatz von N_2O und Kr-85, stellten wir jedoch fest, daß für die in der Literatur empfohlenen (Shaw 1984; Wegner 1982) und bei anderen Anwendern auch beobachteten Ausgangskonzentrationen von ≤ 1000 ppm oder gar < 100 ppm N_2O keine übereinstimmenden Ergebnisse erhalten wurden. (Die Ausgangsaktivität für den Standard-Tracer Kr-85 wurden so gewählt, daß unter unseren Versuchsbedingungen noch mindestens 10000 Impulse/min am Ende des ausgewerteten Zeitraums angezeigt wurden. Wir befanden uns damit im sicheren Bereich, denn nach unseren Erfahrungen wirken sich Interferenzen durch die natürliche Radioaktivität erst bei weniger als 2000 Impulsen/min auf die Meßergebnisse aus.) Mit der Lachgasmethode wurden stets höhere Luftwechselzahlen ermittelt, zumindest solange der Luftwechsel unter 4 pro Stunde lag. Die Differenz der errechneten Ergebnisse ist um so größer, je geringer der Luftaustausch selbst ist. Ausgedrückt als Quotient der Lüftungskoeffizienten n_{N_2O}/n_{Kr-85} ergibt sich ein Ansteigen von nahezu 1 – bei Luftwechsel $> 4 h^{-1}$ –, über 1,5 – bei Luftwechsel um $1 h^{-1}$ –, bis zum Faktor 10 – bei Luftwechsel $\ll 0,1 h^{-1}$ (Bild 2). Eine Abhängigkeit von der Nutzungsart und damit von der Ausstattung der Räume, bei denen es sich um Krankenzimmer, Aufenthaltsräume, teilgeflieste Laborräume, Behandlungszimmer, Operationsräume, Sanitäräume und Bäder, Lager oder Bunker handelt, war nicht festzustellen.

Als Ursache für die unterschiedlichen Meßergebnisse kommen die größere Löslichkeit in dem Feuchtigkeitsfilm (1 Vol. H_2O löst 0,06 Vol. Kr bei $20^\circ C$, 1 Vol. H_2O löst

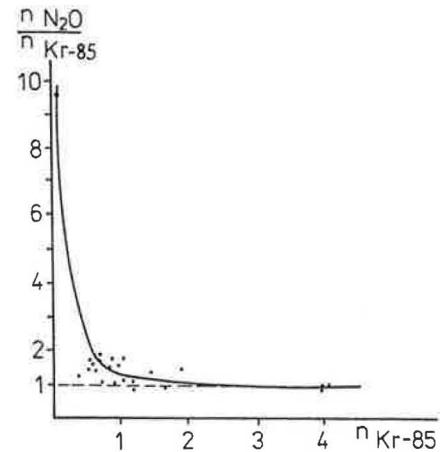


Bild 2. Abhängigkeit des Quotienten der Lüftungskoeffizienten n_{N_2O}/n_{Kr-85} von der Bezugs-Luftwechselzahl n_{Kr-85} für N_2O -Ausgangskonzentrationen = 0,1 Vol.-% (= 1000 ppm).

1,05 Vol. N_2O bei $5^\circ C$) sowie Adsorption des N_2O an Wänden und Oberflächen der Einrichtungsgegenstände in Frage. Daraus schlußfolgernd müßten die Auswirkungen der Störeffekte mit dem Übergang zu höheren Indikatorgasausgangskonzentrationen geringer werden. In der Tat fanden wir Übereinstimmung der Meßergebnisse bei N_2O -Anfangskonzentrationen um 5000 ppm. Praktisch bedeutet das: Für einen Raum von $100 m^3$ Größe werden statt 10 bis 100 Liter rund 500 Liter Lachgas benötigt. (An Kr-85 sind im Vergleich dazu ca. 1 Liter eines Luft-Edelgas-Gemisches erforderlich, hergestellt durch Verdünnen einer 50 mCi = 1,85 GBq-Ampulle mit 10 Liter Luft.)

3.3 CO_2 als Indikatorgas

Fast alle Autoren, die sich mit Fragen der Luftverschlechterung in Räumen befaßten, beginnend mit Pettenkofers grundlegenden Untersuchungen, verglichen die Kohlendioxidkonzentrationen. Wenn auch neuere Untersuchungen ergaben, daß der CO_2 -Spiegel im Zeitalter der „Chemisierung“ unseres Alltags nicht mehr länger allein stellvertretend für den Verunreinigungsgrad der Raumluft stehen kann (Fanger 1988), liegt es doch auf der Hand, das von den Rauminnsassen gelieferte CO_2 als Indikatorgas für die Luftwechselbestimmung zu nutzen, zumal mit der Entwicklung der auf Infrarotabsorption beruhenden Analysentechnik heute kontinuierlich Konzentrationsverlaufskurven aufgezeichnet werden können.

Mit größeren Unsicherheiten behaftet sind ganz bestimmt Ergebnisse, die aus fortlaufenden CO_2 -Pegelmessungen in besetzten Räumen ermittelt werden, allein wegen der Unwägbarkeit der personenbezogenen CO_2 -Abgabe (Penman 1980). Günstiger ist es auf alle Fälle, die Abklingkurve zu verwenden, die sich nach Verlassen des Raumes ergibt, oder Kohlendioxid als Indikatorgas künstlich auszubringen (Stahl-Druckflasche oder Kohlendioxid).

Eigene Vergleichsmessungen mit Kr-85 ergaben jedoch auch hier für den Meßbereich bis 5000 ppm = 0,5 Vol.-% Ausgangskonzentration erheblichere Differenzen als in der Literatur angegeben (Shaw 1984). Im geprüften Be-

reich der Lüftungskoeffizienten von $n = 0,1$ bis $2,0 \text{ h}^{-1}$ beträgt der Quotient $n_{\text{CO}_2}/n_{\text{Kr-85}} = 1,5$, d. h., bei Zugrundelegen der Abklingkurve des mehratomigen Indikatorgases CO_2 errechnet sich im Durchschnitt ein um 50% höher liegender Luftwechsel. Der Quotient nähert sich dem Wert 1, wenn die Luftwechsellmessungen in kurzen zeitlichen Abständen wiederholt werden. Das spricht für die Adsorptionstheorie. Unerheblich waren die Unterschiede zwischen Altbau und Räumen mit frisch gemauerten und verputzten Wänden (Standzeit ca. 6 Monate), was den Schluß zuläßt, daß die chemische Reaktion des CO_2 keinen entscheidenden Beitrag zur Meßwertdiskrepanz liefert.

3.4 SO_2 als Tracer

In zahlreichen mit Luftschadstoffmessungen befaßten Laboratorien stehen automatisch registrierende SO_2 -Monitore zur Verfügung. Die zunehmende Orientierung der Meßintentionen auf den Innenraum legt den Gedanken nahe, die vorhandene Meßtechnik auch für Luftwechseluntersuchungen einzusetzen. Aus diesem Grunde wurde das SO_2 in unsere Studie einbezogen. Es stellte sich aber heraus, daß weder für den Meßbereich $0,45 \text{ mg/m}^3 = 0,167 \text{ ppm}$ noch für den 10fach größeren Meßbereich auswertbare Abklingkurven erhalten werden konnten, so daß SO_2 als Indikatorgas für Luftwechselbestimmungen nicht empfohlen werden kann (vgl. auch Shaw 1984).

4. Berechnung des Lüftungskoeffizienten

Abschließend noch einige Bemerkungen zur Auswertung der Konzentrationsverlaufskurven und Berechnung des Lüftungskoeffizienten oder der Luftwechselzahl selbst. Die durch den Luftaustausch bedingte Konzentrationsabnahme eines Indikatorgases folgt einer Exponentialfunktion, vorausgesetzt, die zeitliche Änderung der Konzentration des Indikatorgases im Raum dc_i/dt ist dem Konzentrationsunterschied $c_i - c_a$ zwischen Raum und Umgebung proportional:

$$\frac{dc_i}{dt} = -n(c_i - c_a) \quad (1)$$

Integration von (1) ergibt:

$$c_{i(t)} = c_a - (c_{i(0)} - c_a) e^{-nt} \quad (2)$$

In halblogarithmischer Darstellung, d. h. Konzentration logarithmisch und Zeit linear aufgetragen, ergibt sich eine Gerade, wenn der Luftwechsel ungestört abläuft, die treibenden Kräfte während des Meßzeitraums also weitgehend konstant bleiben. Die Berechnung der Luftwechselzahl n erfolgt aus der Neigung der Geraden, indem der Zeitpunkt ermittelt wird, an dem die Tracergaskonzentration auf die Hälfte abgefallen ist, wobei in der Regel $c_a \ll c_i$ ist und vernachlässigt werden kann. Aus Gl. (2) ergibt sich dann:

$$\frac{c_{i(t)}}{c_{i(0)}} = \frac{1}{2} = e^{-nt_{1/2}}$$

$$\ln 2 = n \cdot t_{1/2}$$

$$n = \frac{0,6931}{t_{1/2}}$$

Auf N_2O ist das Auswertungsverfahren ohne Einschränkung anwendbar, vorausgesetzt, die Ausgangskonzentration ist ausreichend hoch. Es zeigte sich auch, daß im oben beschriebenen Aktivitätsbereich die natürliche radioaktive Strahlung keinen verfälschenden Einfluß auf die mit Kr-85 erhaltenen Meßergebnisse hat. Beim Kohlensäure-Tracer darf allerdings die CO_2 -Konzentration der zuströmenden Luft nicht vernachlässigt werden. Ihr Beitrag muß von der jeweiligen Konzentration $c_{i(t)}$ in Abzug gebracht werden, weil anderenfalls wegen des logarithmischen Eingangs der Konzentration eine Gerade mit geringerer Neigung resultiert.

Auf eine weitere Fehlerquelle muß noch hingewiesen werden, die sich bei unkritischer Eingabe der Meßdaten bei der rechnergestützten Ermittlung der Regressionsgeraden ergibt. Das wäre z. B. der Fall bei sprunghaften Konzentrationsänderungen durch zwischenzeitliches Türöffnen, die aus den Zahlenwerten in der Regel nicht ohne weiteres erkennbar sind. Es entsteht dabei eine Parallelversetzung der Geraden, über die der Rechner hinwegmitteln würde. Das Ergebnis wäre eine Regressionsgerade mit steilerem Abfall. Der sich errechnende Lüftungskoeffizient wäre größer, als der raumcharakteristischen Konzentrationsänderung entspricht (Bild 3, Fall 1).

Die Versuchsbedingungen können sich auch anderweitig unbemerkt ändern, z. B. ein Fenster öffnet oder schließt sich oder ein Dachlüfter wird in Betrieb gesetzt. Es ergeben sich so zeitlich ganz unterschiedliche Lüftungsbedingungen, die durch eine gemeinsame Regressionsgerade überhaupt nicht widerspiegelt werden können (Bild 3, Fall 2). In ähnlich verfälschender Weise würden sich Konzentrations- oder anzeigebedingte Meßwertabweichungen auswirken (Bild 3, Fall 3). Um solche Unregelmäßig-

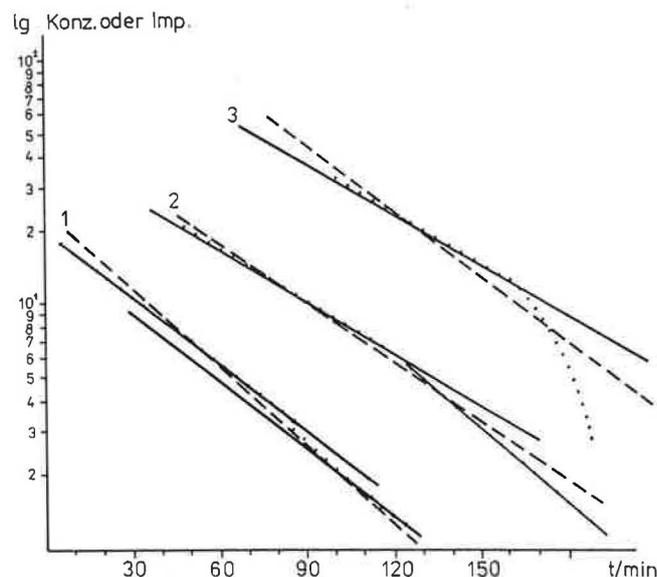


Bild 3. Verfälschung der Regressionsgeraden (gestrichelt) durch:
(1) temporäre Änderung der Lüftungsbedingungen,
(2) permanente Änderung der Lüftungsbedingungen,
(3) Konzentrations- oder anzeigebedingte Meßwertbeeinflussung.

keiten im Kurvenverlauf der Konzentrationsänderung erkennen zu können, empfiehlt sich die graphische Darstellung der Meßwerte auf halblogarithmischem Diagrammpapier auch oder besonders bei der Computerauswertung.

5. Resümee

Zusammenfassend zum Aussagewert von Luftwechselfmessungen ist festzustellen, daß zwar mit jeder Messung nur eine Augenblickssituation erfaßt wird, weil die den Luftaustausch bewirkenden Parameter wie Druck- und Temperaturdifferenzen Änderungen unterliegen können, Messungen unter verschiedenen Witterungsbedingungen jedoch die Schlußfolgerung erlauben, daß die Luftwechselfzahl, präziser, die daraus berechnete Frischluftfrate, durchaus auch bei freier Lüftung ein Raumcharakteristikum sein kann, wobei eine Schwankungsbreite von ca. 10% toleriert werden muß. Voraussetzung ist, daß methodische Fehler weitgehend ausgeschlossen werden.

Literatur

- [1] Beer, M., Heissner, A. und Vogel, G.: Bestimmung des Luftaustausches im geschlossenen Gewächshaus aus Glas oder glasfaserverstärktem Polyester. Dtsch. Agrartechnik (1965) H. 4, S. 166–170.
- [2] Erhorn, H., Gertis, K.: Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel. Ges.-Ing. 107 (1986) H. 1, S. 12–14 und 71–76.
- [3] Fanger, P.O.: Introduction of the olf and the decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors. Energy and Buildings 12 (1988) 1–6. Vgl. auch Gesundh.-Ing. 109 (1988) H. 5, S. 216–219.
- [4] Götting, K., Domberg, H., Hillinger, H.G., Vogg, H.: Die Technik der Luftwechselbestimmung mit radioaktivem KR-85 und ihre Anwendung auf Untersuchungen in Ställen, Gesundh.-Ing. 93 (1972) H. 1, S. 16–20.
- [5] Heidt, F.-D.: Fortschritte bei der Luftwechselfmessung durch Mikrocomputereinsatz. Heizung-Lüftung-Haustechnik 38 (1987) H. 8, S. 391–395.
- [6] Penman, J.M.: An Experimental Determination of Ventilation Rate in Occupied Rooms Using Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. Building and Environm. 15 (1980) H. 1, S. 45–47.
- [7] Shaw, C.Y.: The Effect of Tracer Gas on the Accuracy of Air Change Measurements of Buildings. ASHRAE 90 (1984) Nr. 2816, S. 212–225.
- [8] Schulze, H.-D., Blobel, B.: Luftwechsel und Schadstofflast in Räumen – eine systemanalytische Betrachtung und ihre praktische Anwendung. Z. gesamte Hyg. 26 (1980) H. 9, S. 661–665.
- [9] Schulze, H.-D., Lehmann, H., Komoll, H., Fleischhack, R.: Untersuchungen zu Luftwechsel und Raumklima in fensterlosen Funktionsräumen von Neubauwohnungen. Stadt- u. Gebäudetechnik 37 (1983) H. 6, S. 174–179.
- [10] Schulze, H.-D.: Luftwechseluntersuchungen in der Schulbau-reihe 80 – ein Beitrag zur Lüftungsproblematik in Klassenräumen. Stadt- u. Gebäudetechn. 41 (1987) H. 3, S. 83–85.
- [11] Wegner, J. und Schlüter, G.: Luftqualität in Innenräumen. Hrsg.: K. Aurandt, B. Seifert und J. Wegner. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – New York 1982, S. 31–40.

Wolfgang Kinzelbach:

Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser

317 Seiten, DM 49,— ISBN 3-486-26346-3

Die Behandlung von Grundwasserschäden ist eine interdisziplinäre Aufgabe. Die numerische Modellierung des Transports von Schadstoffen ist eine Methode, die dabei viele Vorzüge bietet. Ihre Grundlagen, ihre konkrete Form und Anwendbarkeit werden eingehend dargestellt.

R. Oldenbourg Verlag, Rosenheimer Straße 145, 8000 München 80