Haustechnik Bauphysik Umwelttechnik

Gesundheits-Ingenieur

101. Jg. 1980 · Heft 8 · Seite 225 – 256

Herausgegeben von W. LIESE und K. W. USEMANN

unter Mitwirkung von F. Baum, H. Künzel und E. Lahmann

in Verbindung mit dem Bundesgesundheitsamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin-Dahlem; Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, München; Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart und Holzkirchen; Gesundheitstechnische Gesellschaft, Berlin.

Untersuchung der CO_2-Konzentration in einem Klassenraum

Dr.-Ing. E. RIGOS

Bei Räumen mit größerer Belegung, wie es bei Klassenräumen oft der Fall ist, kann angenommen werden, daß die natürliche Lüftung unter bestimmten Voraussetzungen nicht ausreicht. Man kann davon ausgehen, daß bei tiefen Außentemperaturen zur Vermeidung von Zugerscheinungen die Fenster zumindest zeitweise geschlossen gehalten werden. Die Unterbrechung einer ausreichenden natürlichen Lüftung hat zwangsläufig die Verschlechterung der Raumluftqualität zur Folge. Das Ausmaß der Raumluftverschlechterung in einem Klassenraum bei geschlossenen Fenstern ist Gegenstand dieser Untersuchung[1].

1. Luftverschlechterung und CO_2-Gehalt

Als Faktoren, die die Luftqualität in einem Aufenthaltsraum beeinträchtigen, sind die von den anwesenden Personen emittierten Schadstoffe zu nennen. Es handelt sich hierbei um Geruchsstoffe, Staubpartikel, Mikroorganismen und Kohlendioxid. Die Faktoren, die die „thermische" Luftqualität beeinflussen (Wasserdampf und Wärme), sollen bei dieser Untersuchung außer Betracht bleiben.

Von der Lüftung erwartet man, daß die im Raum anfallenden Verunreinigungen auf ein physiologisch unbedenkliches Maß verdünnt werden. Weitere nicht personenbedingte Schadstoffe, die gewiß in der Lüftungstechnik auch eine Rolle spielen, sind in Räumen mit großer Belegung von sekundärer Bedeutung. Als Ausnahme sollten Belastungen durch Lösungsmittel u. a. gesundheitsschädliche oder geruchsbelästigende Stoffe genannt werden, die in Neubauten zu Schwierigkeiten führen können.

Man geht davon aus, daß das Maß der personenbedingten Verunreinigungen in der Luft von Aufenthaltsräumen vertretbar ist, wenn der CO_2-Gehalt der Luft den Wert von 0,1 Vol.-% nicht übersteigt. Bei diesem Wert, der als *Pettenkofer*-Zahl bekannt ist, setzt man voraus, daß die CO_2-Anreicherung durch Personen bedingt ist und die Außenluftkonzentration an CO_2 etwa 0,033 Vol.-% beträgt. Bei Abweichungen von diesen Voraussetzungen, ist eine Beziehung zwischen Luftverschlechterung durch Personen und CO_2-Gehalt der Luft nicht mehr anzunehmen. Ob allein ein CO_2-Gehalt von wenig mehr als 0,1 Vol.-% gesundheitsschädlich ist, läßt sich bezweifeln.

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration für CO_2 beträgt 0,5 Vol.-%. Dieser Wert kann jedoch für Aufenthaltsräume nicht herangezogen werden, insbesondere dann nicht, wenn die Einwirkdauer nicht voraussehbar ist.

Aus diesen Überlegungen wurde bei dieser Untersuchung als Maß für die Luftverschlechterung der CO_2-Gehalt des Raumes herangezogen.

[1] Diese Untersuchung wurde vom Rheinisch-Westfälischen TÜV e.V. mit Unterstützung des Maschinenamtes der Stadt Dortmund durchgeführt.

2. Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden in einem Klassenraum einer Realschule der Stadt Dortmund durchgeführt. Der Raum war ein Pavillon-Bau von 8,3 m Länge, 8,2 m Breite und 2,8 m Höhe. Auf beiden Längsseiten waren Fenster vorhanden, wobei auf der einen Seite die Fenster als Oberlichter gestaltet waren. Alle Fenster konnten geöffnet werden, jedoch die Oberlichter nur in Kippstellung. Die maximale Belegung während der Messungen betrug 45 Personen bzw. 0,66 Personen pro m^2.

Die CO_2-Konzentration wurde mit einem Infrarot-Analysator vom Typ UNOR 6 der *Firma Maihak, Hamburg*, gemessen. Der Meßbereich betrug 0 – 5 000 ppm.

Die Sonde zur Probeluftentnahme wurde in der Mitte des Raumes in Kopfhöhe der sitzenden Schüler aufgestellt.

3. Auswertung der Messungen

Die Auswertung der Messungen wurde für die Tage 22.5., 23.5. und 25.5.79 vorgenommen. Die Meßwerte sind jeweils für die Zeit zwischen 2 Pausen in den *Bildern 1* bis *8* dargestellt. Am Ende des Unterrichts wurde durch Öffnen der Fenster gelüftet. Während des Unterrichts blieben die Fenster geschlossen. Lediglich am 23.5. zwischen 9.45 Uhr und 10.45 Uhr waren die kleinen Fenster (Oberlichter) auf der einen Seite des Raumes geöffnet (*Bild 5*).

4. Untersuchungsergebnis

Aus den *Bildern 1* bis *8* ist ersichtlich, daß der CO_2-Gehalt der Luft bei geschlossenen Fenstern des Klassenraumes bedenkliche Werte annahm. Der höchste Wert wurde am 22.5.

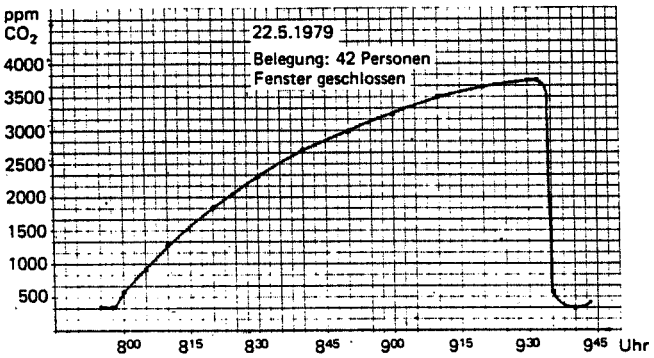

Bild 1.

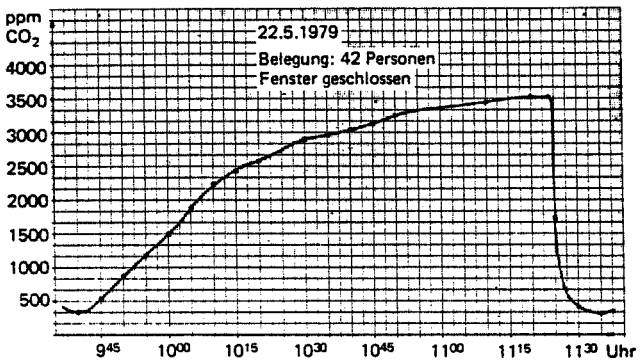

Bild 2.

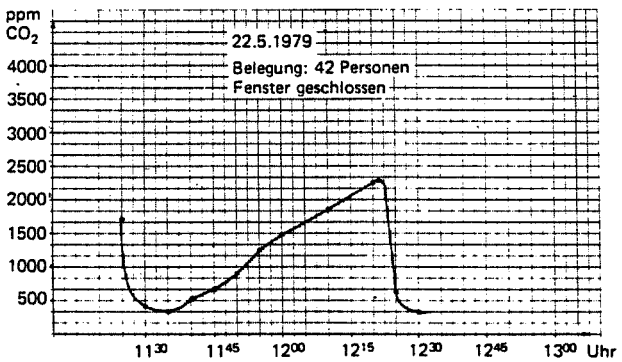

Bild 3.

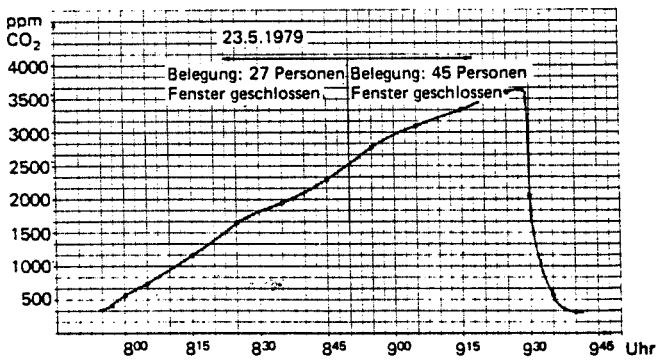

Bild 4.

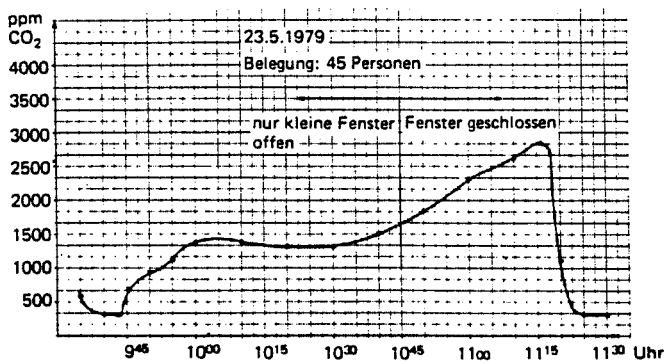

Bild 5.

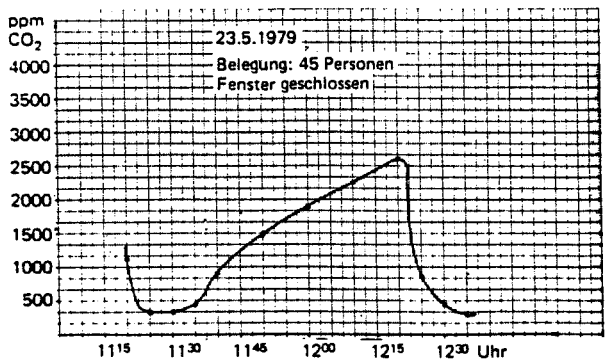

Bild 6.

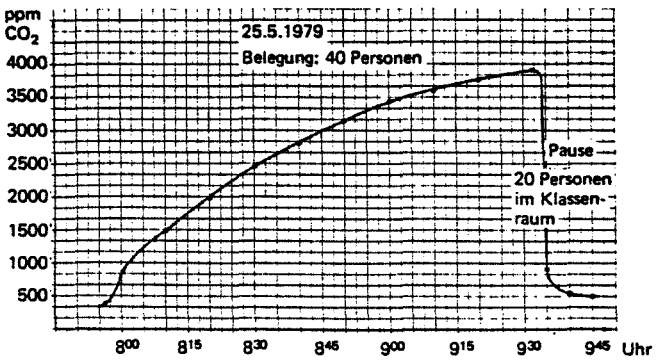

Bild 7.

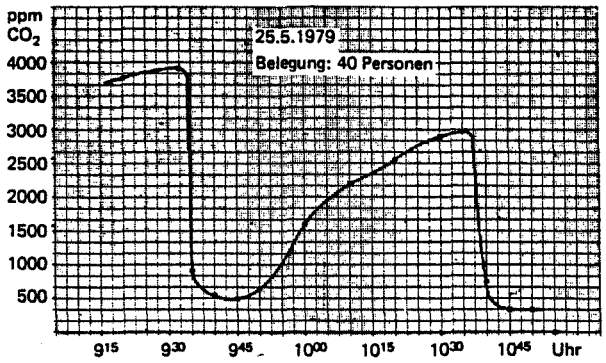

Bild 8.

um 9.32 Uhr ermittelt. Zu diesem Zeitpunkt wurde ein CO_2-Gehalt von 3 759 ppm gemessen. Die Benutzungsdauer ohne Lüftung des Raumes betrug hierbei ca. 1,5 Stunden. Die Ausgangskonzentration betrug bei allen Messungen zwischen 330 und 400 ppm. Diese Werte stimmen mit den aus der Literatur bekannten Werten für die CO_2-Konzentration der Außenluft überein. Der höhere Ausgangswert von ca. 500 ppm am 25.5., 9.45 Uhr (*Bild 7*) ist auf den Aufenthalt von 20 Schülern im Klassenraum zurückzuführen.

Es ist bemerkenswert, daß der erwähnte Grenzwert von 0,1 Vol.-% CO_2 (1 000 ppm) bereits nach 5 bis 15 Minuten erreicht wurde. Daraus kann man erkennen, daß die sogenannte „Stoßlüftung" für Klassenräume kaum praktikabel ist, wenn es gilt, den CO_2-Gehalt nicht über 1 000 ppm ansteigen zu lassen. War der Anstieg des CO_2-Gehaltes über 1 000 ppm bei geschlossenen Fenstern zu erwarten, so erscheint es bedenklich, daß am 23.5. zwischen 9.45 Uhr und 10.45 Uhr bei geöffneten Oberlichtern auf der einen Raumseite der CO_2-Gehalt zeitweise Werte von bis 1 500 ppm erreichte. Es ist sicher anzunehmen, daß während der kalten Jahreszeit keineswegs stärker gelüftet wird, da sonst Zugerscheinungen auftreten werden.

5. Abschätzung des Luftwechsels

Der zeitliche Verlauf des CO_2-Gehaltes der Raumluft bei einer zeitweisen Besetzung ist instationär und wird aus der Bilanz der CO_2-Mengen durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$dC_R \cdot V_R = V_{CO_2} \cdot dt - V_Z \cdot (C_R - C_A)\, dt$$

Es bedeuten dabei

C_R Die Konzentration der Raumluft an CO_2 in Volumenanteilen.

C_A die Konzentration der Außenluft an CO_2 in Volumenanteilen,

V_R Raumvolumen in m^3,

V_Z Außenluftvolumen in m^3/h,

V_R anfallende CO_2-Menge in m^3/h,

t Zeit, gemessen von Anfang der Besetzung.

Berücksichtigt man die Anfangsbedingung, daß für t = 0 die CO_2-Konzentration gleich der Ausgangskonzentration C_A (= Außenluftkonzentration) ist, und setzt man $C = C_R - C_A$, so erhält man die Lösung der Differentialgleichung

$$C = \frac{V_{CO_2}}{V_Z} - \frac{V_{CO_2}}{V_Z} \cdot e^{-\frac{V_Z}{V_R} \cdot t} .$$

Diese Gleichung setzt voraus, daß der Außenvolumenstrom V_Z sowie die anfallende CO_2-Menge in dem betrachteten Zeitabschnitt von t = 0 bis t konstant sind. Da der Außenluftvolumenstrom bei der natürlichen Lüftung im wesentlichen von den herrschenden Windverhältnissen abhängt, die in den meisten Fällen stark veränderlich sind, kann nicht angenommen werden, daß er über längere Zeit konstant bleibt. Auch Schwankungen der von den Personen ausgehenden CO_2-Menge sind in bestimmten Grenzen denkbar.

Aus dem Verlauf des CO_2-Gehaltes am 22.5. zwischen 7.57 Uhr und 9.30 Uhr läßt sich schließen, daß während dieser Zeit konstante Verhältnisse geherrscht haben und deshalb wurde der Versuch unternommen, für diesen Zeitraum die CO_2-Menge sowie den Außenluftvolumenstrom zu berechnen.

Zu diesem Zweck wurde die Gleichung für den Verlauf des CO_2-Gehaltes nach V_{CO_2} eliminiert

$$V_{CO_2} = \frac{C - C_A \cdot e^{-\frac{V_Z}{V_R} \cdot t}}{1 - e^{-\frac{V_Z}{V_R} \cdot t}} \cdot V_Z .$$

In dieser Gleichung sind die zwei Unbekannten V_{CO_2} und V_Z enthalten. Um ein System von zwei Gleichungen zu erhalten, wurde die Gleichung für zwei verschiedene Zeitintervalle ausgewertet. Die gesuchte Lösung ist das Wertepaar von V_Z und V_{CO_2} das der Gleichung für beide gewählten Zeitabschnitte genügt.

Die grafische Lösung des Gleichungssystems (s. *Bilder 9* und *10*) lieferte die Werte

V_Z = 240 m^3/h

V_{CO_2} = 0,957 m^3/h.

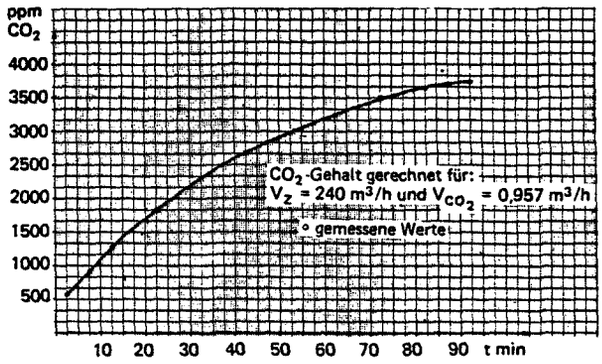

Bild 9.

Die Berechnung des CO_2-Gehaltes in Abhängigkeit von der Zeit, unter Zugrundelegung dieses Außenluftstromes und dieser CO_2-Menge ergab Werte, die nahezu exakt mit den gemessenen Werten übereinstimmen (s. *Bild 9*).

Der ermittelte Außenluftvolumenstrom von 240 m^3/h entspricht einem Luftwechsel von ca. 1,2. Dieser Wert erscheint im Hinblick auf die große Anzahl der zu öffnenden Fenster und somit der möglichen Fugen als realistisch. Die anfallende CO_2-Menge von 0,957 m^3/h entspricht einer CO_2-Menge von 22,8 l pro Person.

Nach *Reinders* [1] beträgt die je Person abgegebene CO_2-Menge 22,5 l. Auch weitere Angaben in der Literatur [2; 3] liegen in dieser Größenordnung. Diese Werte ergeben sich aus der je Stunde ausgeatmeten Luftmenge von ca. 5 m^3 und aus deren Gehalt an CO_2 von ca. 4,5 Vol.-%. Aus dieser Übereinstimmung kann geschlossen werden, daß der ermittelte Wert des Außenluftstroms als gesichert angesehen werden kann. Demnach betrug der Außenluftanteil pro Schüler am 22.5. in der Zeit von 7.57 Uhr bis 9.35 Uhr etwa 5,7 m^3/h.

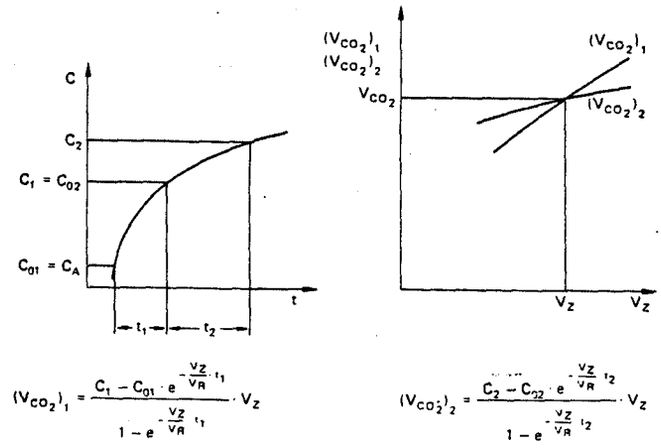

Bild 10. Grafische Bestimmung von V_z und V_{CO_2}.

Die Außenluftrate für raumlufttechnische Anlagen, die bei Außenlufttemperaturen zwischen 0 und 26°C zugrunde gelegt wird, beträgt 20 m^3/h je Person [4].

6. Schlußfolgerung

Bei geschlossenen Fenstern kann die Luftverschlechterung in Klassenräumen beträchtliche Maße erreichen. Die Minderung der Luftqualität erfolgt so schnell, daß eine Stoßlüftung spätestens alle 15 Minuten durchgeführt werden sollte, wenn nahezu ähnliche Luftverhältnisse wie in zwangsbelüfteten Klassenräumen zu erreichen wären. Es bleibt außer Zweifel, daß erzielbare Energieeinsparungen bei Stoßlüftung nur während der Pause auf Kosten der Luftqualität gehen. Man kann vermuten, daß die Einsparung von Lüftungswärme bei Räumen mit großer Belegung nur bei mechanischer Lüftung mit Wärmerückgewinnung erzielbar ist.

Ferner wurde auch bei diesen Messungen die Erkenntnis bestätigt, daß Lüftungszeiten von wenigen Minuten vollkommen ausreichen. Lüftungszeiten von mehr als ca. 7 Minuten erhöhen nur den Energieverbrauch und tragen nicht zur Verbesserung der Luftqualität bei. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen wird mit Sicherheit die notwendige Lüftungszeit noch kürzer sein, da bedingt durch die großen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen der Luftaustausch intensiver erfolgt.

Der aus den Meßergebnissen für einen bestimmten Zeitintervall mit offensichtlich gleichmäßigen Bedingungen rechnerisch gewonnene Wert für die CO_2-Emission der Personen stimmt mit den aus der Literatur bekannten Werten überein.

Literatur

[1] *Reinders, H.:* Energieeinsparung durch Anwendung von Erkenntnissen der Bauphysik. HLH 28 (1977), S. 135 – 140.

[2] *Spegele, H.* und *Steimle, F.:* Klima und Behaglichkeit. KKT (1973), Heft 4/5, Sonderdruck.

[3] *Wiedenhoff, R.:* Die Stoßlüftung von Wohnräumen aus energetischer Sicht. HLH 28 (1977), S. 439 – 444.

[4] DIN 1946 Blatt 1: Lüftungstechnische Anlagen – Grundregeln –

Anschr. d. Verf.: *Postfach 103261, 4300 Essen 1, Rheinisch-Westfälischer TÜV e.V.*