

4. HUBER, B.: Mikroklimatische und Pflanzentemperaturregistrierungen mit dem Multithermographen von Hartmann & Braun. *Jb. wiss. Bot.* 84, 671 (1937).
5. VÖLK, O. H.: Beiträge zur Ökologie der Sandvegetation der oberrheinischen Tiefebene. *Z. Bot.* 24, 81 (1931).
6. SCHADE, A.: Über den Wärmegenuß einiger Moose und Flechten am Valtenberge. *Sitzungsber. u. Abh. Naturw. Ges. Dresden* Jahrg. 1927/28.
7. HUBER, B.: Der Wärmehaushalt der Pflanzen. *Naturw. u. Landwirtsch.* 17 (1935).
8. SCHADE, A.: Über den mittleren jährlichen Wärmegenuß von *Webera nutans* (Schreb.) Hedw. und *Leptoscyphus Taylori* (Hook.) Mitt. im Elbsandsteingebirge. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 35, 410 (1917).

551.510.4:551.586:551.588.7

(Universitätsinstitut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt/M.)

## Untersuchung über den Luftaustausch zwischen Wohnräumen und Außenluft.

Von

Hans-Walter Georgii.

Mit 7 Textabbildungen.

**Zusammenfassung.** Es wird die Selbstlüftung von Wohnräumen in ihrer Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Temperaturunterschieden zwischen Gebäudeinnerem und Außenluft untersucht. Mittels simultaner Aerosol- und Kohlensäuremessungen wird versucht, die beiden Komponenten des Luftaustausches, Wandlüftung und Lüftung durch Ritzen und Fugen, voneinander zu trennen.

**Summary.** Automatic ventilation of inhabited rooms is studied with regard to its dependence on wind velocity and temperature differences between the interior of buildings and outside air. On the basis of simultaneous aerosol and carbonic acid measurements an attempt has been made to separate the two components of air exchange: ventilation through walls and ventilation through clefts and chinks.

**Résumé.** Etude de l'aération naturelle des locaux habités en fonction de la vitesse du vent et de la différence des températures extérieure et intérieure. On cherche à distinguer entre l'aération par les murs et celle qui permettent les fentes et les joints, au moyen de mesures simultanées de l'aérosol et de la teneur en gaz carbonique.

### I. Einleitung.

Die Frage nach der Größe der Selbstlüftung eines Raumes hat als ein wesentlicher Faktor des Begriffes „Raumklima“ und der damit zusammenhängenden Probleme eine große Bedeutung für die Bioklimatologie und darüber hinaus auch für Hygiene und Bautechnik. Es ist daher nicht verwunderlich, daß das Interesse verschiedener Forscher bereits seit Jahren auf Untersuchungen des natürlichen Luftaustausches zwischen Innenraum und Außenluft gerichtet ist und in wertvollen Arbeiten seinen Niederschlag gefunden hat, auf die wir im Verlauf unserer Betrachtungen noch zurückkommen werden.

Der Zweck der vorliegenden Untersuchung ist, die Größe der Selbstlüftung eines vorgegebenen Raumes in Abhängigkeit von den Windverhältnissen der Außenluft zu untersuchen, weiterhin die Frage zu beantworten, inwieweit man eine Lüftung durch die Wandporen von einer solchen durch Ritzen, die unvermeidlich an Fenstern, Türen und Fußböden auftreten, trennen kann und durch vergleichende Messungen in verschiedenen Räumen den Einfluß der Windrichtung und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft auf das ausgetauschte Luftvolumen abzuschätzen.

## II. Frühere Arbeiten über den Selbstlüftungseffekt von Räumen als Grundlage dieser Untersuchung.

Die Tatsache eines Luftdurchtrittes durch Wandporen wurde zuerst von dem bedeutenden Münchener Forcher MAX VON PETTENKOFER erkannt, der bereits im Jahre 1858 [13] auf den Austausch zwischen der kohlensäureangereicherten Zimmerluft und der kohlensäureärmeren Außenluft aufmerksam macht und bereits Modellversuche anstellt, die ihn davon überzeugten, daß die Zimmerwände für Luft durchlässig sind. Er führte weiterhin Messungen über die Größe des Luftaustausches durch, Messungen, deren Ergebnis noch heute als Grundlage vieler Abschätzungen der Raumlüftung in Hygiene und Bautechnik benutzt wird. Das Ergebnis faßte er in der Faustregel zusammen, daß das Luftvolumen eines Raumes durchschnittlich in einer Stunde einmal durch Selbstlüftung erneuert wird. Diese Regel wird auch noch in Darstellungen jüngeren Datums von M. HOTTINGER [6], P. COURVOISIER [2], E. KÜSTER [10], sowie K. EGLOFF [4] zitiert und benutzt, da nur sehr wenige neuere Messungen über den Luftaustausch von geschlossenen Räumen existieren.

Es soll mit ein Hauptziel unserer Untersuchung sein, durch Messungen eine genauere Angabe dieser Größe zu gewährleisten, was auch schon von H. ILZHÖFER [7] und H. WOLPERT [16] in ihren sehr wertvollen Arbeiten angestrebt wurde. Es war ebenfalls PETTENKOFER, der in seinen Ausführungen als erster eine Methode angibt, wie auf verhältnismäßig einfache Weise der Selbstlüftungseffekt eines Raumes größenordnungsmäßig bestimmt werden kann. Wenn auch die dort angegebene Methode hinsichtlich ihrer Genauigkeit höheren Anforderungen nicht genügt, so bildete sie doch die Grundlage für alle Meßvorrichtungen, die später zu diesem Zweck ersonnen wurden.

## III. Grundsätzliche Fragen der Selbstlüftung von Räumen.

Die Tatsache der Existenz einer Selbstlüftung von Räumen kann heute nicht mehr in Frage gestellt werden. Es sind jedoch über ihre Größe und ihren Mechanismus nur wenige Meßergebnisse vorhanden, die zudem alle schon eine Reihe von Jahren zurückliegen. Bevor auf die Methodik und die Ergebnisse unserer Messungen eingegangen werden soll, wollen wir an Hand der vorliegenden Literatur den Luftaustausch zwischen Räumen und der Außenluft theoretisch betrachten.

K. WÜRZNER [17] erwähnt den Luftaustausch durch das Mauerwerk, den er als das „Atmen“ der Wände bezeichnet. Er hält aber die Durchlässigkeit der Mauern für Feuchtigkeit und den Wasserdampftransport von innen nach außen für praktisch bedeutungsvoller als den Luftaustausch.

M. HOTTINGER [6] steht auf dem Standpunkt, daß die Selbstlüftung der Räume hauptsächlich durch die Fugen und Ritzen der Türen und Fenster erfolge, weniger durch die Kapillaröffnungen der Wände selbst. Er betrachtet es aber bei der Vielfalt der Einflüsse und der Schwierigkeit der Messung als unmöglich, die beiden Anteile voneinander zu trennen. HOTTINGER nimmt an, daß der Luftaustausch zusammenhängt mit dem Staudruck des Windes, der auf der windzugewandten Seite, der Luvseite, durch die anströmende Luft ausgeübt wird. Bei diesem Vorgang entsteht auf der Rückseite des Gebäudes, der Leeseite, ein Sog, der etwa  $\frac{2}{3}$  des auf der Luvseite erzeugten Überdruckes beträgt. Dieser Gesamtdruck

$$p = 0,8 v^2 \rho, \quad \rho = 1,2 \text{ kg/m}^3, \quad v \text{ [m/s]}$$

muß auf das Gebäude wirken und die Größe des Luftaustausches wesentlich beeinflussen. Da HOTTINGER diese Zusammenhänge nicht durch Meßergebnisse belegt hat, haben wir unsere Meßergebnisse mit der sich aus obiger Gleichung ergebenden Parabel verglichen, worauf später eingegangen wird. HOTTINGER gibt aber gleichzeitig zu bedenken, daß ein Bauwerk durch den dauernden Wechsel der Windrichtung und -stärke umblasen wird, wodurch eine Berechnung des Luftaustausches sehr erschwert wird.

Außer der Wirkung des Staudruckes schreibt HOTTINGER der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft eine den Austausch verstärkende Wirkung zu. Herrscht in einem Raum eine gegenüber der Umgebung höhere Lufttemperatur, so haben wir uns in mittlerer Höhe des Raumes eine Ausgleichsebene zu denken, oberhalb welcher die Luft aus dem Raum ausströmt und unterhalb welcher die kältere Außenluft in den Raum einströmt. Der hierdurch entstehende Druckunterschied berechnet sich zu:

$$p = g h (\rho_A - \rho_i),$$

wobei die Dichte der Luft auf der kälteren  $\rho_A$  und wärmeren  $\rho_i$ -Seite in  $\text{g/cm}^3$  angegeben ist und  $h$  den Abstand der Ausgleichsebene vom Fußboden bedeutet. HOTTINGER betont in seinen Ausführungen, daß die Temperaturunterschiede im Verhältnis zu den Staudruckeffekten nur kleine Druckunterschiede hervorrufen können.

Wir wollen an dieser Stelle die Ansicht HOTTINGERS durch eine kleine Tabelle mit den sich aus den beiden Gleichungen ergebenden numerischen Werten bekräftigen (Tabelle 1).

Tabelle 1. Staudruck bei wachsender Windgeschwindigkeit.

$v$ (m/s):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$p$ (mm Hg):	0,007	0,029	0,063	0,12	0,175	0,26	0,35	0,44	0,56	0,68	2,8

Für die Berechnung der sich aus der Temperaturdifferenz ergebenden Druckunterschiede benutzen wir eine Angabe von ILZHÖFER über die Höhe der Ausgleichsebene in seinem Versuchsräum, die sich auf Grund differentialmanometrischer Messungen zu 170 cm bei einer Raumhöhe von 3 m ergeben hatte. Wir sind uns bewußt, daß dieser Wert nur exakt für jenen einen Raum gilt, wir wollen aber mit dieser Tabelle auch nur eine größtordnungsmäßige Abschätzung des Druckeffektes bezeichnen (Tabelle 2).

Tabelle 2. Druckeffekt, hervorgerufen durch den Temperaturunterschied zwischen Innenraum und Außenluft.

$t$ (°C):	1	5	10	15	20	25
$p$ (mm Hg):	0,0005	0,0028	0,0056	0,0084	0,012	0,0148

Es zeigt sich, daß diese Druckdifferenzen klein sind gegen die durch den Staudruck des Windes hervorgerufenen. ILZHÖFER fand experimentell bei einer mittleren Temperaturdifferenz von 16° C einen Druckunterschied von 0,013 mm Hg und bei 3,6° C einen von 0,0016 mm Hg, was recht gut mit den errechneten Werten übereinstimmt. Wir sehen aus diesen Angaben aber auch, daß in dem Fall eines Kellerraumes, der in mittelbarer Verbindung mit dem darüberliegenden Schacht des Treppenhauses steht, infolge der etwa zehnmal höher liegenden Ausgleichsebene die Druckunterschiede ebenfalls zehnmal größer als in Tabelle 2 angegeben werden können. Einer mittleren Temperaturdifferenz von 20° C zwischen Haus- und Außenluft müßte dann die Staudruckwirkung eines Windes von 4 m/s entsprechen. Wir werden bei der späteren Besprechung unserer experimentellen Untersuchungen diese Annahme bestätigen können und finden, daß bei Kellerräumen die mittlere Temperaturdifferenz des Hauses zur Außenluft ein wesentlicher Faktor der Selbstlüftung ist, bei Wohnräumen in höheren Stockwerken jedoch von völlig untergeordneter Bedeutung bleibt.

K. EGLOFF [4] findet einen parallelen Gang des Dampfdruckes, der Kern- und Ionendichte in Raum- und Außenluft, wobei stets eine gewisse Phasenverschiebung der Maxima und Minima im Innenraum gegenüber den im Freien gefundenen auffällt. Er hebt hervor, daß bei einer größeren Ansammlung von Menschen in einem geschlossenen Raum der Dampfdruck in einem geringeren Maße ansteigt, als man dies unter Zugrundelegung der durch Atmung und Hautausdünstung an die Zimmerluft abgegebenen Feuchtigkeitsmenge annehmen sollte. EGLOFF sieht darin einen Beweis für die Luftrneuerung durch den Austausch durch das Mauerwerk.

In jüngerer Zeit hat P. COURVOISIER [2] den Luftaustausch in seiner Arbeit über das Eindringen von Schwankungen der meteorologischen Elemente in Gebäude behandelt. Es ist im Zusammenhang unserer Untersuchung über den Selbstlüftungseffekt von Wohnräumen aufschlußreich, die Betrachtungen COURVOISIERS über das Eindringen von Milieufaktoren, worunter er Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Luft oder des Aerosols versteht, die unmittelbar auf den

Körper bzw. das Wohlbefinden des Menschen einwirken können, zu erörtern. Sie sind auch deshalb hier von Bedeutung, weil unsere Überlegungen und Meßmethoden auf einer sehr ähnlichen Betrachtung beruhen. COURVOISIER verfolgt diesen Gedankengang: Die Konzentration eines Spurenstoffes im Innern eines Raumes sei  $c_i$ , in der Außenluft dagegen  $c_A$ , wobei vorausgesetzt ist, daß  $c_i \neq c_A$ . Die beiden Konzentrationen haben nun das Bestreben, sich anzugeleichen. In gewissem Maße wird dieser Angleich durch die Diffusion vor sich gehen, doch ist die Ergiebigkeit der Diffusion so gering, daß innerhalb eines Zeitraumes, in dem die Außenkonzentration im wesentlichen konstant ist, sich die Innenkonzentration nicht merklich ändern wird. Es besteht aber immer ein gewisser Luftaustausch zwischen Innen- und Außenluft. Dieser „Zug“ kann manchmal recht beträchtliche Ausmaße annehmen und COURVOISIER gibt ihm die überragende Bedeutung beim Ausgleich der Konzentrationen  $c_i$  und  $c_A$  des Elementes. In die Rechnung werden die ein- und ausströmenden Luftvolumina  $s_E$  und  $s_A$  einbezogen, die als Funktion der Windgeschwindigkeit anzusehen sind. Es wird angenommen, daß der sich über einen längeren Zeitraum erstreckende Angleichungsprozeß nicht durch kurzperiodische Windschwankungen gestört wird. Es wird also eine stationäre Strömung betrachtet, wobei

$$s_E = -s_A = s(w)$$

ist, mit  $w$  = mittlere Windgeschwindigkeit. Die Änderung der Konzentration im Versuchsräum beträgt dann:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{1}{V} s(w) (c_A - c_i).$$

Diese Differentialgleichung ergibt als Lösung folgenden Ausdruck:

$$c_i(t) = c_i(t_0) + (c_A - c_i(t_0)) \left(1 - e^{-\frac{s(w)}{V} t}\right),$$

$c_i(t_0)$  ist die Konzentration  $c_i$  zu Beginn des Angleichvorganges, d. h. zur Zeit  $t = 0$ . Der Angleichvorgang hat einen exponentiellen Verlauf mit der Zeitkonstanten

$$\lambda = \frac{V}{s(w)}.$$

Es zeigt sich, daß für große Zeiträume, wenn also  $t \gg \lambda$  sich ergibt:  $c_i = c_A$ . Auf die weitergehenden Überlegungen COURVOISIERS wollen wir im Zusammenhang dieser Untersuchung nicht eingehen. Wie wir in den folgenden Ausführungen über die Methodik unserer Untersuchungen noch näher darlegen werden, haben wir in der Hauptsache  $\text{CO}_2$  und Aerosole verwendet, d. h. Spurenstoffe, bei denen wir die Konzentration in der Außenluft gegen die im Versuchsräum künstlich erhöhte Konzentration als klein vernachlässigen können. Es ergibt sich auf diese Weise ein rechnerisch einfacherer Ausdruck für die Konzentrationsabnahme mit der Zeit:

$$c_i(t) = c_i(t_0) e^{-\frac{s(w)}{V} t}.$$

Die Größe  $s$  ist bei der Behandlung unseres Problems von ausschlaggebender Bedeutung, da sie eine Aussage über das in der Zeiteinheit ausgetauschte Luftvolumen macht. Abweichend von COURVOISIER und in Übereinstimmung mit den Annahmen von HOTTINGER haben wir die Größe  $s$  als von der Windgeschwindigkeit und dem Temperaturunterschied zwischen Innenraum und Außenluft abhängig behandelt. Für die numerische Berechnung des ausgetauschten Luftvolumens erhalten wir dann folgende Gleichung

$$s(w, T) = 2,302 \frac{V}{t} \log \frac{c_i(t_0)}{c_i(t)}, \quad T = \text{Temperatur in } {}^{\circ}\text{C}.$$

Diese Beziehung ist lediglich eine mathematische Formulierung des Angleichvorganges. Sie sagt noch nichts darüber aus, inwieweit dieser Austausch auf eine Diffusion oder eine Strömung durch Spalten und Fugen zurückzuführen ist. Man kann lediglich schließen, daß die Selbstlüftung eines Raumes in ihrem zeitlichen Ablauf einer Exponentialfunktion folgen soll. Unsere Meßreihen werden später zeigen, daß diese Annahmen durchaus berechtigt sind. Nach Voranstellung dieser theoretischen Überlegungen soll jetzt die Durchführung und Methode der Messungen besprochen werden.

#### IV. Methodik der Messungen.

Das Ziel der Messungen, die von Juni bis August 1951 und von Februar bis Dezember 1952 vorgenommen wurden, war, die von PETTENKOFER aufgestellte und bereits durch die Meßergebnisse von ILZHÖFER und WOLPERT verbesserte Faustregel eines stündlichen Austausches des gesamten Luftvolumens eines Raumes durch einen funktionellen Zusammenhang zwischen der Größe  $s(w, T)$  und der Windgeschwindigkeit, sowie der Temperaturdifferenz zur Außenluft zu ersetzen. Es sollte weiterhin untersucht werden, inwieweit Wasserdampf, Kohlendioxyd und Aerosole als Spurenstoffe für diesen Zweck verwendbar sind. Die Methodik bestand darin, daß der Versuchsräum mit einem der genannten Spurenstoffe angereichert wurde, und man dann die Konzentrationsabnahme des Elementes mit der Zeit verfolgte. Die Geschwindigkeit der Konzentrationsabnahme ist ein Maß für die Größe des Luftaustausches, d. h. der Größe  $s(w, T)$ , die dann nach der oben angegebenen Formel berechnet werden kann.

Der überwiegende Teil der Messungen wurde im Labor II des Univ.-Institutes für Meteorologie und Geophysik in Frankfurt am Main vorgenommen. Dieser Versuchsräum ist ein rechteckiges Zimmer mit  $32 \text{ m}^3$  Rauminhalt, Ziegelmauern normaler Dicke, zwei Außenwänden, zwei Türen und einem Fenster. Der Raum befindet sich im 2. Stockwerk des Gebäudes, die Außenwände zeigen nach SSE und ENE. Die Innenwände des Versuchsräumes sind nicht tapiziert, der Fußboden ist mit Holzdielen belegt. Größere Undichtigkeiten, wie Ritzen an Türen und Fenstern wurden verklebt, um größere Ungenauigkeiten zu vermeiden. Jede Meßserie erstreckte sich im allgemeinen über 4 Stunden; Zwischen-

messungen wurden jede 30 bis 45 Minuten vorgenommen. Während der Meßperiode wurden weder Türen noch Fenster geöffnet, die Luftproben wurden durch eine kleine verschließbare Öffnung vom Nebenraum entnommen.

#### V. Methode der Messungen mit Wasserdampf.

Die leichte Herstellung von Wasserdampf durch Zersprühen von Wasser zu kleinen Tröpfchen, die unmittelbar in der Luft verdampfen und die leichte Meßbarkeit des Wasserdampfgehaltes der Luft mit dem Assmannschen Psychrometer ließen den Wasserdampf als für unsere Zwecke geeignet erscheinen. Es wurde dabei im Versuchsräum eine solche Menge Leitungswasser mittels Preßluft durch eine feine Nibulosa-Düse zerstäubt, die ausreichen müßte, den Sättigungsdampfdruck bei der jeweiligen Temperatur zu erreichen. Dieser wurde jedoch in praxi nie ganz erreicht, da ein großer Teil des zerstäubten Wassers direkt an den Raumwänden adsorbiert wurde.

Nach dem Zerstäuben des Leitungswassers wurde die Abnahme des Dampfdruckes laufend verfolgt. Da sich das Psychrometer nach etwa 2 Minuten auf einen konstanten Wert einstellt, ließen sich innerhalb einer Meßperiode verhältnismäßig viele Einzelmessungen durchführen. Die leichte Handhabung der Messung bietet gewiß große Vorteile, doch hat die Verwendung von Wasserdampf auch sehr große Nachteile. Es bleibt einmal der Dampfdruck der Außenluft infolge seines täglichen periodischen Gangs während einer Meßperiode von 4 Stunden nicht konstant, sondern weist während dieser Zeitspanne Schwankungen bis 3 mm Hg auf. Da es außerdem infolge der Adsorption des Wasserdampfes an die Wände nicht möglich war, den Sättigungsdampfdruck zu erreichen, so blieb die Dampfdruckdifferenz zwischen Raum und Außenluft stets verhältnismäßig klein.

Wie die Arbeiten verschiedener Autoren zeigen, ist sicher mit einem Wasserdampfaustausch durch die Wände zu rechnen. Bei den Austauschbetrachtungen von Stoffen verschiedener Konzentrationsverteilung spielt die Diffusion und Adsorption eine wichtige Rolle, so daß wir hier kurz darauf eingehen wollen.

BLOKKER [1] hat die Wasserdampfdiffusion durch einige technische Werkstoffe behandelt und gefunden, daß sie nach dem ersten Fickschen Gesetz verläuft. Bei Zugrundelegung der Durchlässigkeit unseres Mauerwerkes errechnet sich nach diesem Gesetz eine Konzentrationsabnahme von 4%/Std. auf Grund des Diffusionsvorganges. Dieser Wert beträgt aber nur  $1/10$  der bei unseren Selbstlüftungsversuchen mit Wasserdampf gefundenen Konzentrationsabnahmen, so daß wir annehmen können, daß der Diffusion nur eine untergeordnete Bedeutung beizumessen ist.

Es zeigte sich aber, daß die weitere Verwendung von Wasserdampf für die Austauschmessungen durch ein anderes Phänomen ausgeschlossen wurde. Bei der Auswertung der Meßergebnisse trat stets ein Knick bei einfacher logarithmischer Darstellung der Abnahme der Dampfdruckdifferenz mit der Zeit auf. Dieser Knick trat bei allen Messungen deutlich

hervor, so daß eine Gesetzmäßigkeit darin gesehen werden muß. Die Abb. 1 zeigt in einfach-logarithmischer Darstellung den Verlauf der Abnahme der Dampfdruckdifferenz. Zu Beginn der Messung betrug die Dampfdruckdifferenz gegenüber der Außenluft 6,4 mm Hg.

Man erkennt deutlich, daß nach einer Meßzeit von 20 Minuten eine Unstetigkeitsstelle im exponentiellen Verlauf der Kurve auftritt. Wir glauben nicht fehlzugehen, wenn wir annehmen, daß diese Knickstelle mit einer weiteren Wasserdampfadsorption in den Poren und an der Oberfläche des Mauerwerkes zusammenhängt. Die Adsorption von Dämpfen wird bekanntlich bei Annäherung an den Sättigungsdampfdruck

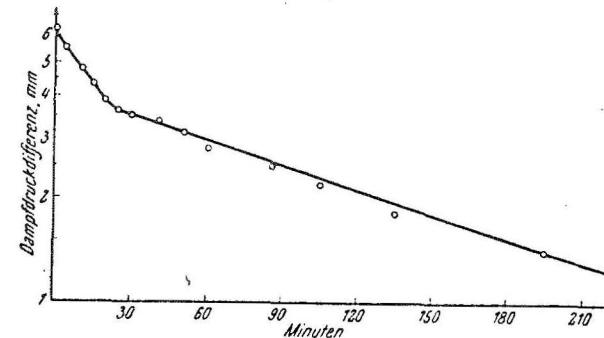


Abb. 1. Zeitlicher Verlauf der Dampfdruckdifferenz zwischen Außen- und Innenluft.

wesentlich verstärkt, was durch die Kapillarkondensation in den kapillaren Öffnungen des Mauerwerkes erklärt wird. Diese Kapillarkondensation dürfte bei unseren Versuchen die wesentliche Rolle bei der starken Abnahme des Dampfdruckes im Versuchsräum während der ersten 15 Minuten der Messung sein. Dieser Schluß wird bestärkt durch das Ergebnis der  $\text{CO}_2$ - und Aerosolmessungen, bei denen dieser Knick nicht auftritt. Die starke Kapillarkondensation des Wasserdampfes verfälscht das Ergebnis der Messungen zur Bestimmung des Luftaustausches sehr stark, da sie zumindest während der ersten halben Stunde die Abnahme des Wasserdampfgehaltes der Luft im Versuchsräum, die durch tatsächlichen Austausch mit wasserdampfärmerer Luft hervorgerufen wird, überdeckt. Nach einer halben Stunde ist aber die Dampfdruckdifferenz gegenüber der Außenluft schon auf einen solch geringen Wert gesunken, daß Schwankungen des Dampfdruckes der Außenluft das Meßergebnis stark verfälschen. Wir haben daher das ausgetauschte Luftvolumen nicht nach dieser Methode berechnet und wollen bei der Besprechung der Meßergebnisse nicht mehr auf die Wasserdampfmessungen eingehen.

## VI. Methode der Messungen mit Kohlendioxyd.

Bei den bisher in der Literatur erschienenen Arbeiten über Versuche zur Messung der Selbstlüftung von Räumen wurde stets der Versuchsräum mit Kohlendioxyd angereichert und die Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration

mit der Zeit verfolgt. Für die dabei angewandten Meßmethoden bildete zumeist das Verfahren von PETTENKOFER und K. LUNGE [11] die Grundlage. Durch die geringe  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Außenluft, die nach einer großen Anzahl Messungen von KREUTZ [9] in der bodennahen Schicht durchschnittlich 0,0438% beträgt, sowie durch seine chemische Indifferenz und leichte Analysierbarkeit erscheint die Verwendung dieses Gases sehr empfehlenswert.

Die verschiedenen Verfahren zur quantitativen  $\text{CO}_2$ -Bestimmung der Luft sind bei KÜSTER und EFFENBERGER [3] zusammengestellt, so daß wir hier auf eine nähere Beschreibung verzichten können. Die titrimetrische Methode, nach der wir arbeiteten, geht in ihren Grundzügen auf PETTENKOFER zurück und wird von F. P. TREADWELL [15] in seinem Lehrbuch beschrieben. Die Ausführung der Messung, die im einzelnen etwas von der bei TREADWELL beschriebenen Weise abweicht, gestaltete sich wie folgt: Es wurden Glaskolben von 1, 2 und 4 l Inhalt verwendet. Bei höherer  $\text{CO}_2$ -Konzentration, d. h. zu Beginn einer Meßreihe genügt ein Kolben kleineren Volumens, bei Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration mit fortschreitender Zeit ist eine größere Luftmenge für die Analyse erforderlich. Die Kolben wurden bis auf einen Druck von 1 bis 2 cm Hg evakuiert und die Luftproben durch eine Glasröhre, die in 1 m Höhe in der Tür zum Versuchsräum angebracht war, vom Nebenraum aus entnommen. Die Analyse und die Berechnung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luftprobe erfolgte dann wie von TREADWELL angegeben. Diese titrimetrische Methode hat sich im Verlauf unserer Untersuchungen sehr gut bewährt. Es wurden damit 250 Analysen gemacht. E. KÜSTER hat das Verfahren mit Hilfe bekannter vorgegebener  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen überprüft und einen durchschnittlichen Fehler von 2,3% gefunden. Das zur Messung gelangende  $\text{CO}_2$  wurde aus einer Bombe in den Versuchsräum geleitet, bis eine Konzentration von 1 bis 2% erreicht war. Es wurden dann während einer Meßperiode von 4 Stunden sieben bis acht Luftproben entnommen und nach obigem Verfahren analysiert. Während der Messung ist darauf zu achten, daß die Luft im Versuchsräum mittels eines Ventilators ständig gut umgerührt wird, um eine gleichmäßige Verteilung der Kohlensäure zu garantieren.

Wir wollen nun die physikalischen und chemischen Vorgänge untersuchen, die zur Verminderung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes im Versuchsräum beitragen, ohne daß dies ein Effekt des Luftaustausches ist. Eine solche Betrachtung ist von früheren Autoren unterlassen worden, scheint uns aber zur Fehlerabgrenzung wichtig. Die Diffusion des  $\text{CO}_2$  durch die Poren des Mauerwerkes erfolgt ebenfalls nach dem 1. Fickschen Gesetz. Der Diffusionskoeffizient des  $\text{CO}_2$  in Luft beträgt  $0,136 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , die Konzentration der Außenluft kann vernachlässigt werden, so daß wir für die Innenkonzentration  $c_i = 100\%$  setzen können. Das 1. Ficksche Gesetz lautet:

$$dn = -DF \frac{dc}{dx} dt$$

Dabei ist  $dn$  die  $\text{CO}_2$ -Menge in Gramm, die in Richtung des Konzentrationsgefäßes durch die Fläche  $F$  diffundiert.  $D$  ist die Diffusionskonstante in  $\text{cm}^2/\text{sec}$ . Da  $\frac{dn}{dt} = \frac{dc}{dt} V$  ist, erhalten wir:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{DF}{Vx} (c_i - c_A).$$

Wenn wir die entsprechenden Maße unseres Versuchsraumes in obige Formel einsetzen, ergibt sich eine Konzentrationsabnahme von 5%/Std., bei Berücksichtigung einer Porosität des Mauerwerkes von 20%. Dieser Konzentrationsabnahme entspricht ein Luftaustausch von 0,75 l/sec. Dieser Austausch ist zwar um den Faktor 2 bis 3 kleiner als der in unserem Versuchsraum bei Windstille tatsächlich gemessene Luftaustausch (Abb. 4), doch berücksichtigt unsere Überlegung auch nicht den sicherlich ebenfalls recht beträchtlichen Diffusionsanteil durch Spalten und Fugen.

Eine Absorption und chemische Umsetzung des  $\text{CO}_2$  mit dem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , das im Putzmörtel Verwendung findet, tritt nach dem Ergebnis von Modellversuchen nicht ein. Wir können damit rechnen, daß in älterem, ausgetrocknetem Mauerwerk die Umsetzung des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu  $\text{CaCO}_3$  restlos beendet ist.

Über die 'Adsorption' des  $\text{CO}_2$  an verschiedenen Werkstoffen hat W. PATRICK [12] umfangreiche Untersuchungen angestellt, denen wir entnehmen können, daß bei einer Temperatur von 15°C bei einem Partialdruck von 15 mm Hg, der einer Konzentration von 2% entspricht, etwa der 25. Teil  $\text{CO}_2$  adsorbiert wird wie Wasserdampf bei einer relativen Feuchte von 85%, wie es den Versuchsbedingungen unserer Wasserdampfmessungen entspricht. Wir können zusammenfassend sagen, daß die Adsorption des  $\text{CO}_2$  bei unseren Messungen nur kleine Werte annehmen dürfte und das Meßergebnis dadurch nicht verfälscht wird.

## VII. Methode der Aerosolmessungen.

Bei der Verwendung von Aerosolen gingen wir von einem anderen Grundgedanken aus als bei den oben beschriebenen Gasen. Die Selbstlüftung eines Raumes setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, dem Luftaustausch durch Wandporen und dem durch Fugen und Ritzen. Während Gase im allgemeinen ungehindert durch die Kapillaröffnungen der Wände diffundieren können, kann die Abnahme einer Aerosolkonzentration außer durch die 'kernvernichtenden Prozesse' wie Sedimentation, Koagulation und Diffusion an die Wände nur durch den Luftaustausch durch Spalten und Ritzen vor sich gehen. Wir hofften daher, auf Grund der Ergebnisse der Aerosolmessungen die Möglichkeit zu haben, den Anteil der Selbstlüftung infolge Diffusion durch das Mauerwerk von dem infolge Strömung durch Spalten und Ritzen der Türen und Fenster zu trennen.

Das Prinzip der Meßmethode mit Aerosolen ist das gleiche wie bei den beiden vorher beschriebenen Verfahren mit Gasen. Der Versuchsraum

## Untersuchung über d. Luftaustausch zwischen Wohnräumen u. Außenluft. 201

wird mit einem gegenüber der Außenluft hohen Kerngehalt angereichert und die Abnahme der Kernzahl mit der Zeit verfolgt. Die 'kernvernichtenden Prozesse', die wir als Fehlerquelle unserer Messungen zu betrachten und im Ergebnis entsprechend zu berücksichtigen haben, sowie die Einzelheiten der Methode werden an anderer Stelle [5, 8] ausführlich beschrieben, so daß wir uns hier auf die wesentlichen Grundzüge beschränken wollen.

Für unsere Untersuchungen ist es wichtig, daß eine möglichst große Persistenz des Aerosols gewährleistet ist, d. h. wir waren bestrebt, den Einfluß der 'kernvernichtenden Prozesse' möglichst klein zu halten und trotzdem den Versuchsraum mit Kernen so anzureichern, daß das natürliche Aerosol dagegen vernachlässigt werden konnte. Es zeigte sich, daß Kerne vom Radius  $3-5 \cdot 10^{-5}$  cm und eine Kerndichte von 500 Teilchen/ $\text{cm}^3$  diesen Anforderungen hinreichend genügen. Die Konzentrationsabnahme mit der Zeit, die durch die Sedimentation, Koagulation und Diffusion der Kerne an die Wände hervorgerufen wird, beträgt für einen Raum von der Größe des Labors II bei Verwendung eines Aerosols der oben angegebenen Größenordnung 8%/3 Std., wie sich aus den entsprechenden Gleichungen leicht ausrechnen läßt. In diesem Wert spielt die Sedimentation mit 6 bis 7%/3 Std. die entscheidende Rolle. Die Berechnung der 'kernvernichtenden Prozesse' haben wir außerdem noch experimentell durch Messungen in der absolut dicht schließenden Klimakammer des Max Planck-Institutes für Biophysik in Frankfurt am Main ergänzt. Diese Messungen, die unter denselben Bedingungen wie jene im Labor II vorgenommen wurden, haben die rechnerisch abgeschätzten Werte sehr gut bestätigt. Sie ergaben eine Konzentrationsabnahme von 10%/3 Std., die nur auf die 'kernvernichtenden Prozesse' zurückzuführen ist und um die wir das Ergebnis unserer Luftaustauschmessungen zu korrigieren haben.

Das Aerosol wurde durch Zersprühen von Leitungswasser oder einer  $\frac{1}{500}$  normal  $\text{CaCl}_2$ -Lösung mittels Preßluft erzeugt. Beim Zerstäuben von Leitungswasser entstehen kleine Tröpfchen, die in der Luft verdampfen, wobei die im Wasser gelösten Bestandteile als feste Teilchen schwebend zurückbleiben. Beim Zersprühen von  $\text{CaCl}_2$ -Lösung dagegen bleiben feine Lösungströpfchen in der Luft schwebend zurück. Die Größe der entstehenden Partikel hängt bei vorgegebener Düse von dem Überdruck ab, mit dem die Flüssigkeit zerstäubt wird. Die Messung der Kerndichte erfolgte mit dem von CHR. JUNGE entwickelten 'Doppelkonimeter', einer verbesserten Ausführung des bekannten Zeiß-Konimeters. Die Luftproben wurden durch ein verschließbares Röhrchen vom Nebenraum des Versuchsraumes aus abgesaugt, so daß während der vierstündigen Meßperiode der Versuchsraum weder betreten, noch Tür oder Fenster geöffnet werden mußte. Die Auszählung der Präparate geschah unter dem Mikroskop bei 1050facher Vergrößerung nach der bewährten Methode von M. RÖTSCHKE [14]. Parallel zu den Aerosolmessungen wurden im gleichen Raum zu gleicher Zeit auch  $\text{CO}_2$ -Messungen vorgenommen.

### VIII. Ergebnisse der Messungen mit Kohlendioxyd und Aerosol in Labor II.

Die Verwendung von Kohlendioxyd zur Bestimmung der Größe des Luftaustausches zwischen Räumen und der Außenluft geht, wie bereits erwähnt, auf die Arbeiten von PETTENKOFER, WOLPERT und ILZHÖFER zurück. Wir haben bei unseren Untersuchungen von April bis Oktober 1952 insgesamt 35 Meßreihen mit  $\text{CO}_2$  durchgeführt. Gleichzeitig haben

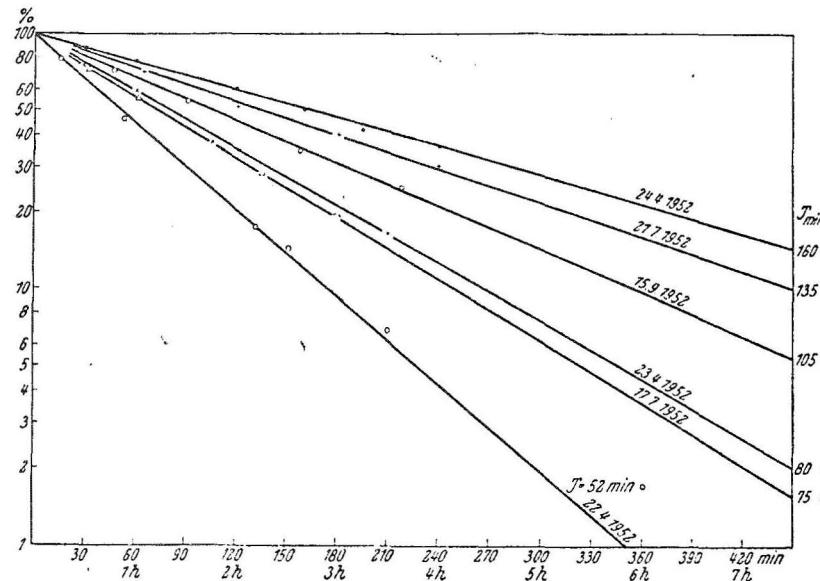


Abb. 2. Abnahme einer Kohlendioxydkonzentration mit der Zeit in Labor II.  
Abszisse: Zeit in Minuten. Ordinate: Konzentration in Prozent.  
Die jeweilige Ausgangskonzentration wird  $\approx 100$  gesetzt.

In der rechten Spalte ist das Datum der Messung und die Halbwertzeit ( $T$ ) der Konzentrationsabnahme angegeben sowie das Zeichen, mit dem die Einzelmessungen eingetragen sind.

wir in demselben Versuchsräum, dem Labor II des Meteorologischen Universitäts-Institutes, 18 Parallelmessungen mit Aerosolen vorgenommen. Durch die gleichzeitige Durchführung beider Messungen wurde eine zwischenzeitliche Änderung der meteorologischen Bedingungen ausgeschlossen und so die Eindeutigkeit des Ergebnisses gesichert. In Abb. 2 und 3 geben wir einige Beispiele dieser Meßreihen. Sie zeigen die Konzentrationsabnahme mit der Zeit in einfacher-logarithmischer Darstellung. Damit die Übersichtlichkeit des Bildes nicht zu stark beeinträchtigt wird, haben wir in jeder Abbildung nur 6 Meßtage ausgewählt. Die Ausgangskonzentration des  $\text{CO}_2$  und des Aerosols im Versuchsräum, d. h. zur Zeit  $t = 0$ , wurden 100% gleichgesetzt. Die Konzentrationsabnahme mit der Zeit folgt bei beiden Prozessen, wie sich der Abbildung unschwer entnehmen läßt, einer Exponentialfunktion. Wir können diese

Feststellung als experimentelle Bestätigung der von COURVOISIER angenommenen Gesetzmäßigkeit werten. Aus der hier angewandten Art der Darstellung läßt sich leicht die Halbwertzeit der Konzentrationsabnahme entnehmen. Aus den in Abb. 2 und 3 gegebenen Beispielen sieht man ferner, daß die Konzentration des  $\text{CO}_2$  bzw. des Aerosols im Versuchsräum an den verschiedenen Meßtagen unterschiedlich schnell abnimmt, und wir wollen dies in der Hauptsache durch den Einfluß der Windgeschwindigkeit erklären. Es soll daher bei der weiteren Diskussion der Wind als

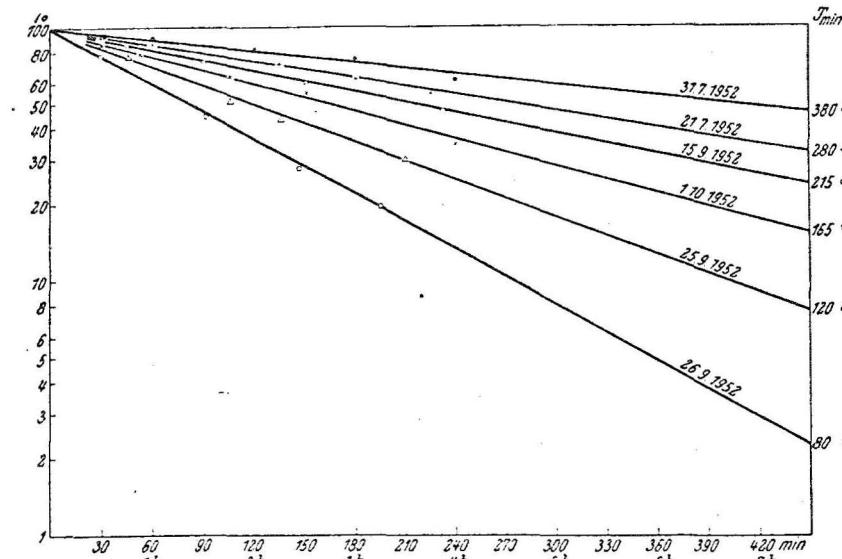


Abb. 3. Abnahme einer Aerosol-Konzentration mit der Zeit auf Grund von Messungen in Labor II.  
Abszisse: Zeit in Minuten. Ordinate: Konzentration in Prozent.  
Die jeweilige Ausgangskonzentration wird  $\approx 100$  gesetzt.

In der rechten Spalte ist das Datum der Messung und die Halbwertzeit ( $T$ ) der Konzentrationsabnahme angegeben sowie das Zeichen, mit dem die Einzelmessungen eingetragen sind.

wesentlicher Faktor für die Größe des Luftaustausches von Räumen herausgestellt und zunächst behandelt und danach die Wirkung der Temperaturdifferenz zur Außenluft auf das ausgetauschte Luftvolumen besprochen werden.

### IX. Die Größe des Selbstlüftungseffektes des Labors II und seine Abhängigkeit vom Wind.

Die Formel

$$s(w, T) = 2,302 \frac{V}{t} \log \frac{c_i(t_0)}{c_i(t)}$$

gibt uns die Möglichkeit, auf Grund der gemessenen Konzentrationsabnahmen von  $\text{CO}_2$  und Aerosol das in der Zeiteinheit ausgetauschte

Luftvolumen, mit anderen Worten, die Größe der Selbstlüftung des Raumes, zu berechnen. Bei den  $\text{CO}_2$ -Messungen haben wir außer der Größe  $s(w, T)$ , die die Dimension  $1/\text{sec}$  hat, noch einen auf die Größe des Raumes bezogenen Wert berechnet, den sogenannten „Lüftungskoeffizienten“, dessen Definition  $s(w, T)/V$  und dessen Dimension  $(\text{h}^{-1})$  ist. Dieser Lüftungskoeffizient hat weitgehenden Eingang in die Literatur gefunden, und wir wollen deshalb zum Vergleich unserer Messungen mit den Ergebnissen anderer Autoren ebenfalls diese Größe einführen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß der Lüftungskoeffizient einen physikalisch einwandfreien Vergleich verschiedener Räume miteinander

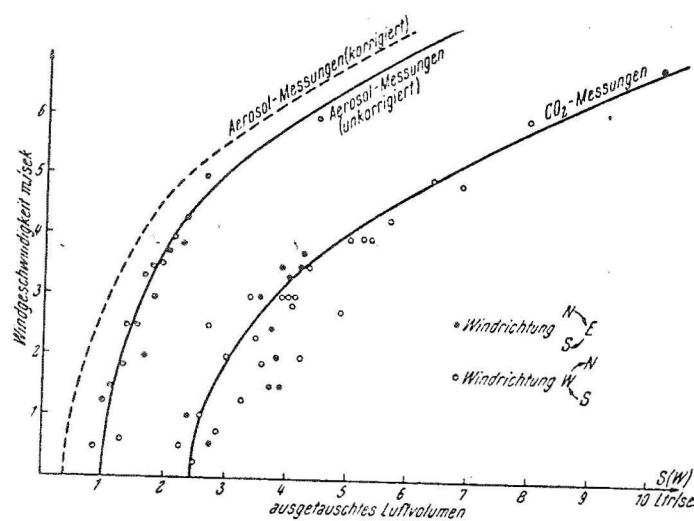


Abb. 4. Die Selbstlüftung des Labor II des Frankfurter Meteorologischen Institutes in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit.

nicht zuläßt, da er die für die Wandlüftung zweifellos wesentliche Oberfläche des Raumes nicht mit in die Betrachtung einbezieht. Er beantwortet uns aber die im Rahmen dieses Problems wichtige Frage, welcher Bruchteil des Raumvolumens pro Stunde durch die Selbstlüftung ausgetauscht wird und gestattet uns gleichzeitig eine Überprüfung und Präzisierung der Pettenkofer'schen Faustregel, der ja ein Lüftungskoeffizient von 1,0 zugrunde liegt. Wir haben daher davon Abstand genommen, die Größe  $s(w, T)$  auf das Verhältnis Oberfläche/Raumvolumen zu beziehen, wodurch wir einen Koeffizienten der Dimension dem Diffusionskoeffizienten gleich, erhalten hätten. Diese verschiedenen Angaben würden die Übersichtlichkeit der Meßergebnisse stark herabsetzen, ohne unsere Kenntnisse über die Selbstlüftung wesentlich zu erweitern. Die mittels  $\text{CO}_2$ - und Aerosolmessungen gefundenen Werte haben wir in Abb. 4 und 5 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit graphisch aufgetragen.

Die Abb. 4 läßt uns folgendes erkennen:

1. Die durch die Meßreihen mit  $\text{CO}_2$  und Aerosol gewonnenen Kurven beschreiben den Luftaustausch zwischen Labor II und der Außenluft in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Beide Kurven werden in erster Näherung durch Parabeln wiedergegeben. Das bedeutet, daß die Größe  $s(w)$  — womit wir ausdrücken wollen, daß bei dieser Überlegung die Größe  $s$  als nur vom Wind abhängig betrachtet werden soll — bei höherer Windgeschwindigkeit sehr stark zunimmt.

2. Bei Windstille zeigt die durch die  $\text{CO}_2$ -Meßpunkte gelegte Parabel einen Luftaustausch von  $2,5 \text{ l/sec}$  an. Wir glauben, diesen Effekt auf die Diffusion des  $\text{CO}_2$  durch die Wandporen und die Fugen und Ritzen zurückführen zu können. Diese Diffusion wird theoretisch durch das Ficksche Gesetz beschrieben und erklärt sich aus dem Konzentrationsgefälle des  $\text{CO}_2$  nach der Außenluft hin. Gleichzeitig wird eine Diffusion von außen nach innen stattfinden, da im Versuchsräum infolge des höheren  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft die  $\text{N}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Konzentration geringer ist als in der Außenluft. Dieser Diffusionsvorgang dürfte von einer gewissen bioklimatischen Bedeutung sein, da sich aus ihm ein Abtransport des  $\text{CO}_2$  aus Räumen, in denen sich viele Menschen aufhalten, auch bei Windstille ableiten ließe. Wir müssen uns aber gleichfalls vor Augen halten, daß es sich bei der Diffusion um einen molekularen Vorgang handelt, und die Diffusionsgeschwindigkeit nur sehr klein ist.

3. Während die ausgezogene durch die Aerosolmeßpunkte gelegte Parabel die „kernvernichtenden Prozesse“ nicht berücksichtigt, haben wir die unterbrochen gezeichnete Kurve korrigiert, so daß sie repräsentativ ist für die Abnahme der Aerosolkonzentration durch den Luftaustausch. Sie verläuft bei Windstille fast durch den Nullpunkt. Hierdurch wird die Annahme bekräftigt, daß der Betrag von  $2,5 \text{ l/sec}$ , der bei Windstille auftritt, durch die Diffusion des  $\text{CO}_2$  durch die Wände erklärt werden kann. Beim Aerosol tritt eine Diffusion *durch* die Wand nicht auf. Daß die korrigierte Aerosolkurve bei Windstille nicht genau durch Null verläuft, könnte man entweder durch fehlende Meßwerte bei Windstille und daraus folgende Ungenauigkeit der Kurve in Nullpunktnähe oder durch eine schwache Selbstlüftung, hervorgerufen durch Temperaturunterschiede zwischen Raum und Außenluft erklären. Eine eindeutige Entscheidung ist hier nicht möglich.

4. Die durch die Aerosolmessungen festgelegte Austauschparabel scheint in erster Näherung nur die Selbstlüftung des Raumes durch Spalten und Fugen an Fensterrahmen und Türfüllungen zu beschreiben, während die  $\text{CO}_2$ -Kurve den Gesamtluftaustausch unter Einbeziehung der „Wandlüftung“ wiedergibt. Die Simultanmessungen mit  $\text{CO}_2$  und Aerosol geben uns auf diese Weise eine Möglichkeit, die beiden Komponenten des Luftaustausches getrennt zu behandeln.

5. Bei höherer Windgeschwindigkeit beobachtet man ein leichtes Divergieren der  $\text{CO}_2$ - und der Aerosolkurve. Diese Divergenz legt den Schluß nahe, daß bei erhöhter Windgeschwindigkeit auch der Diffusionsvorgang durch die Wand verstärkt wird, weil der Abtransport des

hinausdiffundierten  $\text{CO}_2$  an der Außenseite des Hauses durch die bewegte Luft schneller erfolgt.

6. Eine Abhängigkeit des Selbstlüftungseffektes von der Windrichtung tritt bei unseren Messungen nicht klar hervor. Bei Wind mit einer Westkomponente scheint die Streuung der Einzelwerte etwas geringer zu sein als bei Wind mit einer Ostkomponente. Infolge der Nähe des Nachbarhauses werden Ostwinde stark gestört und abgelenkt, während SW-Winde wegen der freien Lage des Gebäudes nach SW ungestörter anströmen können. In diesem Zusammenhang soll auf die verhältnismäßig starke Streuung der Einzelmeßpunkte hingewiesen werden. Sie ist weniger auf Meßfehler zurückzuführen als auf die Tatsache, daß die Windgeschwindigkeit nur ein den Austausch beeinflussendes Moment ist, wenn auch wohl das wesentliche. Die hier angegebenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen stellen nur über 4 Stunden gemittelte Durchschnittswerte des Windes aus den zehnminütigen Angaben des Windschreibers des Frankfurter Wetteramtes dar. Die Windgeschwindigkeit weist aber innerhalb 4 Stunden oft recht große Abweichungen vom Mittelwert auf, und es liegt die Vermutung nahe, daß der Grad der Böigkeit, kleinräumige Turbulenz und im Sommer die im einzelnen nicht angebbare Vertikalbewegung der Konvektionsströmung die „stille“ Entlüftung der Räume ebenfalls beeinflussen.

Zusammenfassend können wir hervorheben, daß die Abhängigkeit der Größe  $s(w)$  von der Windgeschwindigkeit sich durch folgende Gleichung beschreiben läßt:

$$s(w) = a + b v^2, \quad v = \text{Windgeschwindigkeit in m/s.}$$

Diese gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, daß die durch die Temperaturdifferenz zur Außenluft bewirkte Entlüftung klein gegen den Windeffekt ist, und mit der Einschränkung, daß  $a$  und  $b$  raumabhängige Konstanten sind, die für jeden Raum neu bestimmt werden müssen. Der Austausch bei Windstille, also nach unserer Annahme im wesentlichen die Diffusion durch die Wände, wird durch die Konstante  $a$  wiedergegeben, die daher bei den Aerosolmessungen gegen Null geht.

Die Abb. 5 stellt eine Erweiterung der in Abb. 4 für unseren Versuchsräum dargelegten Ergebnisse dar. Die Abszisse gibt in dieser Darstellung den Lüftungskoeffizienten, d. h. den Bruchteil des in einer Stunde ausgetauschten Raumvolumens wieder. In die Abbildung sind die von ILZHÖFER und von uns auf Grund der  $\text{CO}_2$ -Messungen gefundenen Meßpunkte eingetragen. Aus dieser Darstellung ergeben sich folgende bemerkenswerte Punkte:

1. Es zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung unserer Werte mit den von ILZHÖFER angegebenen. Wir können daraus folgern, daß die Selbstlüftung der beiden von ILZHÖFER untersuchten Räume ebenfalls in der Hauptsache auf die Wirkung des Windes zurückzuführen ist, und daß die Konstanten  $a$  und  $b$  größtenteils mit den für Labor II in die oben angegebene Gleichung eingehenden Konstanten übereinstimmen müssen.

2. Als weiteres wesentliches Ergebnis soll festgehalten werden: Bei normalen Wohnräumen tritt ein Lüftungskoeffizient von 1,0, d. h. ein stündlicher Luftaustausch von der Größe des Raumvolumens erst bei einer Windgeschwindigkeit von 6 bis 7 m/s auf. Diese Windstärke wird aber bei der geschützten Lage unserer Großstädte nur vorwiegend kurzperiodisch beobachtet, während des Zeitraumes, in dem wir unsere Messungen durchführten, hielt sie nur an einem Tage für die Dauer von 4 Stunden an.

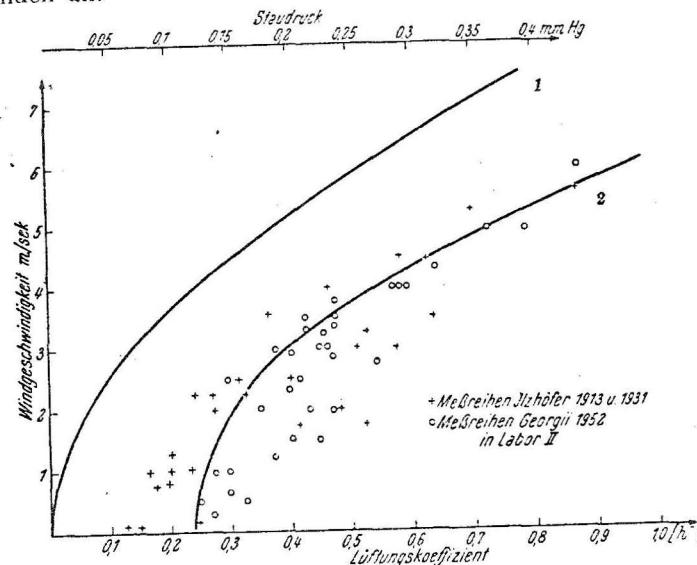


Abb. 5. Der „Lüftungskoeffizient“ in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. 1 = Staudruckparabel  $p = 0,8 v^2 \gamma$  nach M. HOTTINGER. 2 = Lüftungskoeffizient [ $h^{-1}$ ] in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit.

3. Der durchschnittliche Lüftungskoeffizient des Labors II des Meteorologischen Institutes beträgt für 35  $\text{CO}_2$ -Messungen 0,46.

Für die in Frankfurt am Main am häufigsten auftretenden Windgeschwindigkeiten von 2,3 bis 2,7 m/s ergibt sich ein durchschnittlicher Lüftungskoeffizient von 0,36.

ILZHÖFER fand für die beiden von ihm untersuchten Räume Lüftungskoeffizienten von 0,52 und 0,32, wobei zu bemerken ist, daß der Raum, auf den sich der letztere Wert bezieht, im Erdgeschoss liegt und der Mittelwert nur aus vier Meßreihen gebildet wurde. Es sei noch angefügt, daß ILZHÖFER den Raum, für den er den Wert 0,52 angibt, später tapziert hat. Erneut vorgenommene Messungen erbrachten eine um 17% niedrigere Selbstlüftung. Diese Verminderung des Luftaustausches erklärt er durch die geringere Luftdurchlässigkeit der tapzierten Wände gegenüber den ursprünglich getünchten.

4. In Abb. 5 haben wir außerdem noch die nach den Angaben von M. HOTTINGER berechnete Staudruckparabel eingezeichnet. Wir können

die Annahme HOTTINGERS, daß möglicherweise ein paralleler Verlauf zwischen Staudruck und der natürlichen Ventilation der Räume besteht, durch den offensichtlichen Zusammenhang der beiden Kurven bestätigen. Die Lüftungsparabel ist um den Betrag  $a$  gegen die Staudruckparabel verschoben, wobei wir  $a$ , wie bereits oben ausgeführt, durch die Diffusion zu erklären suchen.

Zur Verallgemeinerung der in zahlreichen Meßreihen in Labor II gefundenen Ergebnisse und besonders zur Überprüfung der Frage, inwieweit der Selbstlüftungseffekt von der Windrichtung abhängt, haben wir unsere Untersuchungen auf einen weiteren Raum im gleichen Stockwerk wie das Labor II ausgedehnt, über die anschließend berichtet werden soll.

#### X. Vergleichsmessungen zwischen Labor II und einem anderen Raum im 2. Stock des Institutsgebäudes.

Um die Entlüftung eines anderen Raumes mit den für das Labor II gefundenen Größen vergleichen zu können, haben wir sechs Meßreihen in Labor II und dem Vergleichsraum im gleichen Stockwerk parallel laufen lassen. Hierdurch wurde die Voraussetzung erfüllt, daß beiden Messungen die gleichen meteorologischen Bedingungen zugrunde liegen. Jener Raum entspricht baulich dem Labor II. Er besitzt ebenfalls zwei Türen und ein Fenster, weicht jedoch in zwei Punkten von unserem „Standardraum“ ab: sein Rauminhalt beträgt  $58 \text{ m}^3$  und seine Außenwände sind nach WNW und WSW gerichtet. Die Ergebnisse dieser  $\text{CO}_2$ -Messungen sind der Tabelle 3 zu entnehmen:

Tabelle 3.

Meßtag	Wind m/s	Labor II		Vergleichsraum	
		$s(w)$ 1/s	Lüftungskoeffizient h <sup>-1</sup>	$s(w)$ 1/s	Lüftungskoeffizient h <sup>-1</sup>
24. IX. 1952	SW 3,0	4,1	0,45	4,0	0,24
25. IX. 1952	SW 4,8	7,0	0,79	5,1	0,32
26. IX. 1952	SW 6,1	7,7	0,87	5,8	0,39
30. IX. 1952	SE 1,4	3,6	0,40	4,0	0,23
2. X. 1952	WSW 4,3	5,7	0,64	5,2	0,33
8. X. 1952	NW 4,0	5,25	0,59	4,3	0,27

Wir erkennen aus Tabelle 3 unmittelbar, daß wohl ein paralleler Gang der Zahlenwerte in beiden Räumen auftritt, wie dies ja auch infolge der erörterten Abhängigkeit der Größe  $s$  von der Windgeschwindigkeit einleuchtend ist. Überraschenderweise ist aber die Entlüftung des Vergleichsraumes nicht nur relativ auf die Raumgröße bezogen, sondern sogar absolut [durch die Größe  $s(w)$  ausgedrückt] geringer als die Selbstlüftung des Labors II. Der Durchschnitt der Lüftungskoeffizienten aus den sechs Meßreihen (es wurden bewußt Tage mit überdurchschnittlicher

Windgeschwindigkeit gewählt) beträgt für das Labor II: 0,62, für den Vergleichsraum dagegen nur 0,30.

Eine eindeutige Abhängigkeit des Selbstlüftungskoeffizienten von der Windrichtung ist bei diesen wenigen Messungen nicht festzustellen. Das Meßergebnis des 30. September 1952, an dem bei SE-Wind die stille Entlüftung des Vergleichsraumes größer ist als die des Labors II, kann auf einem Zufall beruhen und ist allein noch nicht beweiskräftig.

Ein wesentlicher Grund für die geringere Entlüftung des Vergleichsraumes dürfte der Linoleumfußboden dieses Zimmers sein, der eine erheblich geringere Permeabilität hat als der Holzdielenboden des Labors II. Bereits WOLPERT stellte die Behauptung auf, daß ein kleinerer Raum besser entlüftet als ein großer, doch fehlt bei ihm ein exakter Vergleich, da die von ihm untersuchten Räume unterschiedliche Tapeteierung aufwiesen und in verschiedenen Gebäuden gelegen waren.

Wir müssen an dieser Stelle erneut auf die physikalische Unzulänglichkeit des Lüftungskoeffizienten hinweisen, der einen exakten Vergleich zweier verschieden großer Räume nicht erlaubt, da er das für die Wandlüftung wichtige Verhältnis Oberfläche/Volumen des Raumes, das sich mit wachsender Raumgröße zu immer kleiner werdenden Brüchen verschiebt, nicht berücksichtigt. Dadurch, daß mit zunehmender Größe des Raumes das Volumen schneller wächst als die Oberfläche, kann bei sonst gleicher baulicher Beschaffenheit in der Zeiteinheit nur ein geringerer Bruchteil des Rauminkaltes eines großen Raumes ausgetauscht werden als dies bei einem kleinen der Fall ist.

Es ist aber auf der anderen Seite praktisch unmöglich, in einem Stockwerk eines Gebäudes zwei Räume zu finden, die sich in ihrer baulichen Beschaffenheit völlig gleichen (auch hinsichtlich der Größe und Zahl der Ritzen und Fugen), so daß eine von äußeren Fehlern freie Vergleichsmöglichkeit gewährleistet wäre. Unsere Vergleichsmessungen waren nur insofern ein erster Schritt zu einer befriedigenden Lösung dieses Problems, als ihr Ergebnis frei ist von Einflüssen unterschiedlicher Witterung.

#### XI. Der Zusammenhang zwischen der Größe des Luftaustausches und dem Temperaturunterschied zur Außenluft.

Nachdem wir im vorigen Abschnitt die Größe  $s(w, T)$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit untersucht haben, wollen wir uns nun mit dem zweiten Faktor, den HOTTINGER für die Größe des Selbstlüftungseffektes wesentlich hält, beschäftigen, der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft. Wir haben in der grundsätzlichen Überlegung zu dieser Frage im ersten Teil dieser Arbeit hervorgehoben, daß im allgemeinen der Temperaturunterschied zur Außenluft die Entlüftung eines Raumes nur unwesentlich beeinflussen kann. In Abb. 6 haben wir die von WOLPERT und ILZHÖFER in den von ihnen untersuchten Räumen und die von uns im Labor II gefundenen Lüftungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Ver-

suchsraum und Außenluft aufgetragen. Die Abbildung zeigt eindrucksvoll, daß hier kein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen den beiden Größen bestehen kann, bzw. ein solcher durch andere Faktoren völlig überdeckt wird. WOLPERT hat seine Untersuchung allein auf dem Grundgedanken der Abhängigkeit der ausgetauschten Luftmenge von der Temperaturdifferenz zur Außenluft aufgebaut, ohne Berücksichtigung des Windes. Es soll nicht bestritten werden, daß ein großer Temperaturunterschied zwischen Raum- und Außenluft den Austausch fördert, wir müssen aber zumindest in freiliegenden und in höheren Stockwerken ge-

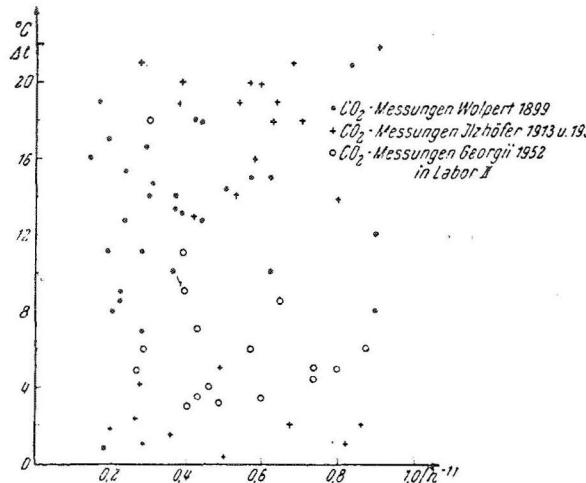


Abb. 6. Der „Lüftungskoeffizient“ in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zur Außenluft.

legenen Räumen dem Windeinfluß die überragende Bedeutung beimesse. Diese Aussage gilt jedoch nicht für Kellerräume, wie die im Luftschutzkeller des Institutsgebäudes durchgeföhrten Messungen anschaulich zeigen.

Dieser Kellerraum hat ein Volumen von  $30 \text{ m}^3$ , entspricht in der Größe also gut dem Labor II, sein Fenster und eine Stahltür schließen verhältnismäßig dicht. Der Raum ist in sehr gutem baulichem Zustand, zwei Wände wurden erst vor wenigen Monaten frisch verputzt. Das Kellergeschoß reicht bis 1,8 m in den Erdboden hinein, so daß nur der obere, über der Erdoberfläche gelegene Teil des Raumes für den Lufteintritt von außen in Frage kommt.

Bei der Auswertung dieser Messungen erzielten wir das verblüffende Ergebnis, daß der Selbstlüftungseffekt dieses Kellers weitaus größer ist als der des Labors II. Der Unterschied der ausgetauschten Luftvolumina war so überraschend, daß wir zuerst an eine chemische Umsetzung des bei der Messung benutzten  $\text{CO}_2$  mit dem erst wenige Monate alten Verputz dachten und drei Parallelmessungen mit Aerosol vornahmen. Da auch die Aerosolmessungen einen größeren Ventilationswert anzeigen als bei gleicher Windgeschwindigkeit in Labor II durchgeföhrte, gewannen wir

die Überzeugung, daß die Entlüftung des Kellers tatsächlich wesentlich schneller vor sich geht als die Entlüftung des Labors II. Wir wollen zunächst in Tabelle 4 eine Übersicht über die gefundenen Meßwerte bringen, bevor wir eine Deutung der starken Selbstlüftung des Kellers geben. Die letzte Spalte der Tabelle gibt die Temperaturunterschiede des Gebäudeinneren gegenüber der Außenluft an.

Tabelle 4.

Meßtag	Wind m/s	CO <sub>2</sub> -Messungen		Aerosolmessun- gen, $s(w, T)$ corr. Keller/Labor II 1/s	Temperatur- differenz °C
		$s(w, T)$ Keller 1/s	Lüftungskoeff. Keller/Labor II h <sup>-1</sup>		
9. X. 1952	SW 2,7	6,8	0,81/0,56	—	+ 9,0
10. X. 1952	WNW 2,3	5,1	0,61/0,40	—	+ 7,0
13. X. 1952	ENE 2,0	10,7	1,28/0,43	—	+ 17,0
14. X. 1952	S 2,8	6,9	0,84/0,47	—	+ 10,5
21. X. 1952	NE 1,0	5,8	0,70/0,28	0,68/0,50	+ 11,3
23. X. 1952	S 2,0	8,0	0,95/0,40	1,10/0,70	+ 12,0
27. X. 1952	SW 1,7	8,5	1,01/—	1,50/0,65	+ 12,5
11. XII. 1952	SW 2,0	11,9	1,43/—	—	+ 21,0
12. XII. 1952	SW 2,5	9,7	1,17/—	—	+ 16,0
13. XII. 1952	W 10,5	10,9	1,31/—	—	+ 15,0
15. XII. 1952	W 2,5	9,3	1,14/—	—	+ 15,0

Wenn wir den 13. Dezember 1952 mit der abnorm hohen Windgeschwindigkeit unberücksichtigt lassen, ergibt sich aus den zehn Werten ein mittlerer Lüftungskoeffizient von 1,15, wobei die Windgeschwindigkeit stets kleiner als 3 m/s war. Ein einwandfreier Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Selbstlüftung besteht nicht. Eine Ausnahme macht lediglich der 13. Dezember, an dem die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 10,5 m/s (mit Spitzenböen bis 30 m/s) den Austauschvorgang natürlich beeinflußt. Es ist auch nicht verwunderlich, daß die Kellerlüftung von der Windgeschwindigkeit unabhängig ist, denn die Luftbewegung in Bodennähe ist mit dem in 20 m Höhe herrschenden Wind, der den Angaben der Tabelle zugrunde gelegt ist, kaum noch vergleichbar. Es zeigte sich aber, daß die Selbstlüftung des Kellers durch einen anderen Effekt bestimmt wird, nämlich durch die Sogwirkung der warmen, im Treppenhaus nach oben steigenden Luft. Der Vorraum des Kellers steht in Verbindung mit dem Treppenhaus, in dem während der Meßperiode ein wesentlicher Temperaturunterschied zur Außenluft herrschte. Die warme Luft steigt im Treppenhaus, fast vergleichbar mit der Strömung im Inneren eines Schlosses hoch, während gleichzeitig als Ersatz von unten frische Luft angesaugt wird. Durch diesen Sog wird der große Selbstlüftungseffekt des Kellers bewirkt, und es wird klar, daß er von der Temperaturdifferenz zwischen der geheizten Innenluft und der kalten Außenluft abhängt.

Eine experimentelle Überprüfung dieser Hypothese gelang uns, indem wir eine brennende Kerze an ein Glasröhrchen hielten, das durch ein

Loch in der Stahltür in den Keller hineinreichte. Durch die Wirkung der aus dem Keller in den Vorraum ausströmenden Luft wurde die Kerze fast zum Erlöschen gebracht. Bei der gleichen Probe an einem in das Labor II hineinreichenden Röhrchen zeigte die Kerze kein Anzeichen ausströmender Luft.

Wir haben zur Bestätigung dieses Zusammenhangs zwischen der Größe  $s(w, T)$  und der Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeinneren und der Außenluft die in Tabelle 4 angegebenen Werte des Lüftungskoeffizienten in Abhängigkeit von der mittleren Temperaturdifferenz an dem betreffenden Meßtag in Abb. 7 aufgetragen. Diese Darstellung

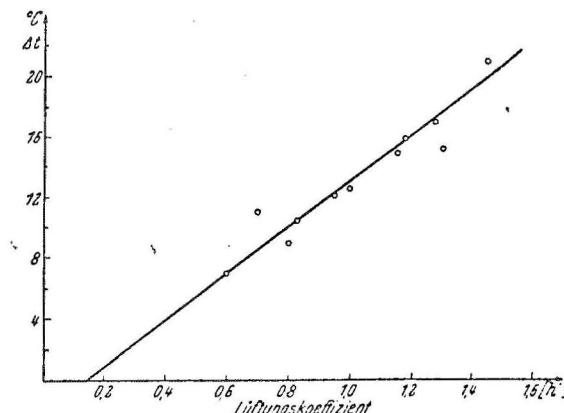


Abb. 7. Der „Lüftungskoeffizient“ eines Kellerraumes in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zur Außenluft.

zeigt, daß das ausgetauschte Luftvolumen der Temperaturdifferenz proportional ist. Wir können diesen Zusammenhang in erster Näherung durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$s(T) = a + b \Delta T^\circ, \Delta T = \text{Temperaturdifferenz in } {}^\circ\text{C}.$$

In dieser Gleichung sind  $a$  und  $b$  wiederum raumabhängige Konstanten, von denen wir  $a$  auch bei diesem Lüftungsvorgang durch die Diffusion des  $\text{CO}_2$  durch das Mauerwerk erklären wollen. Daß die Gerade in Abb. 7 nicht genau durch den Nullpunkt verläuft, führen wir wiederum auf die Diffusion des  $\text{CO}_2$  zurück.

Auf Grund der neuen Erkenntnisse, die wir aus diesen Messungen gewonnen, können wir die Selbstlüftung eines Raumes folgendermaßen beschreiben: In höheren Stockwerken ist der Einfluß der Windgeschwindigkeit für die Größe des ausgetauschten Luftvolumens entscheidend. Der Zusammenhang dieser beiden Größen wird durch die Gleichung

$$s(w) = a + b v^2$$

beschrieben. Die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft ist in höheren Stockwerken für die Entlüftung der Räume von völlig untergeordneter Bedeutung.

Bei Kellerräumen und wohl auch noch im Erdgeschoß ist die mittlere Temperaturdifferenz des Hausinneren zur Außenluft der für die Größe des Luftaustausches entscheidende Faktor. Die Größe  $s$  läßt sich für diesen Lüftungsvorgang in erster Näherung

$$s(T) = a + b \Delta T^\circ$$

ausdrücken. Der Windeinfluß tritt bei der Selbstlüftung von Kellerräumen vollkommen in den Hintergrund. Wir können weiterhin schließen, daß bei Räumen in mittleren Stockwerken sich beide Faktoren überlagern und beide die Selbstlüftung dieser Räume bewirken. Es ist natürlich damit zu rechnen, daß die Entlüftung der Keller jahreszeitlich sehr verschieden groß ist und im Winter ihr Maximum erreicht.

WOLPERT erwähnte bereits in seiner Arbeit die vorzügliche Selbstlüftung eines von ihm untersuchten Kellers, der bei einer Temperaturdifferenz von  $10,8^\circ\text{C}$  einen Lüftungskoeffizienten von 0,83 aufwies. Er führt den starken Luftaustausch auf die schlechte bauliche Verfassung des Versuchsräumes zurück. Wir glauben jedoch, daß auch bei WOLPERT der Effekt in der Hauptsache auf den Luftsog des Hauses zurückzuführen ist, und der eventuell schlechtere Wandverputz nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Es scheint uns, daß diese Untersuchungen durch die Verwendung von Aerosolen, wodurch in erster Näherung eine Trennung der beiden Anteile der Selbstlüftung, der Wand- und der Ritzentlüftung, gelang und durch die systematische Behandlung der beiden die Größe des ausgetauschten Luftvolumens bestimmenden Faktoren, Windgeschwindigkeit und Temperaturunterschied zwischen Innenraum und Außenluft, einen gewissen Fortschritt in der Behandlung des Problems der Selbstlüftung von Wohnräumen darstellt. Herrn Prof. MÜGGE und Herrn Privatdozent Dr. JUNGE sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit gedankt.

#### Literaturverzeichnis.

1. BLOKKER, W.: Wasserdampfdurchlässigkeit. Z. angew. Chemie 52, 648 (1939).
2. COURVOISIER, P.: Über das Eindringen von Schwankungen der meteorologischen Elemente in Gebäude. Arch. Met. Geoph. Biokl. B 2, 162 (1951).
3. EFFENBERGER, E.: Meßmethoden zur Bestimmung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre und die Bedeutung derartiger Messungen für die Bioklimatologie. Ann. d. Meteorol. 3, 321 (1950).
4. EGLOFF, K.: Über das Klima im Zimmer und seine Beziehung zum Außenklima. Diss. E. T. H. Zürich Nr. 766, 1933.
5. GEORGII, H.-W.: Versuch einer Bestimmung des Luftaustausches zwischen Wohnräumen und der Außenluft unter Anwendung von Aerosolen. Z. f. Aerosol-Forschung und -Therapie, 2, 523 (1953).
6. HOTTINGER, M.: Lüftungs- und Klimaanlagen. Berlin: Springer-Verlag, 1940.
7. ILZKÖFER, H.: Untersuchungen über natürliche und künstliche Lüftung von Wohnräumen. Arch. f. Hyg. 105, 322 (1931).

8. JUNGE, CHR.: Die Konstitution des atmosphärischen Aerosols. Ann. d. Meteorol. Beiheft 1952.
9. KREUTZ, W.: Der Kohlensäuregehalt der unteren Luftschichten in Abhängigkeit von Witterungsfaktoren. Angew. Botanik 23, 89 (1941).
10. KÜSTER, E.: Wohnungsklimatische Untersuchungen. Z. f. Hyg. 110, 324 (1928).
11. LUNGE, G.: Zur Frage der Ventilation. Zürich: Verlag O. Schmidt, 1879.
12. PATRICK, W.: Die Aufnahme von Gasen durch das Gel der Kieselsäure. Diss. Univ. Göttingen, 1914.
13. PETTENKOFER, M. v.: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München: Verlag Cotta, 1858.
14. RÖTSCHKE, M.: Untersuchungen über die Meteorologie der Staubatmosphäre. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig 11, 1 (1937).
15. TREADWELL, F. P.: Analytische Chemie, Band 2. Leipzig 1943, 511.
16. WOLPERT, H.: Über die Größe des Selbstlüftungskoeffizienten kleiner Wohnräume. Arch. f. Hyg. 36, 220 (1899).
17. WÜRZNER, K.: Zur Messung des Feuchtigkeitsaustausches im Putzmörtel. Gesundheitsing. 67, 24 (1944).

551.584.4:551

(Meteorologisches Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe

## Das Mikroklima in einem künstlich beregneten Tabakbestand.

Von

M. Diem.

Mit 16 Textabbildungen.

**Zusammenfassung.** Ein Tabakbestand von 5 ha wurde allnächtl. Niederschlagsgaben von 8 bis 10 mm künstlich beregnet. Die Steigerung der Roheinnahmen auf nahezu den dreifachen Betrag rechtfertigt die Schaffungskosten der Beregnungsanlage und die umfangreichen klimatischen Untersuchungen.

Durch die Beregnung entsteht im geschlossenen Pflanzenraum ein Klima, bei dem alle Extreme gemildert sind. Die tägliche Schwankung der Temperatur wird geringer, die Feuchtigkeit bleibt höher und der Boden ist im gewissen Wurzelraum der Pflanzen durchfeuchtet. Die Feuchte im Bestand bleibt immer über 45%, wogegen sie in der nicht beregneten Umgebung während 7,5 Stunden darunter absinkt. Die Temperatur eines Blattes mit Blattbestand unterscheidet sich im allgemeinen nur wenig von der Temperatur der Umgebung und unterschreitet nur kurzzeitig bei Nebel die Taupunktstemperatur. Zu allen anderen Zeiten ist ein Feuchtigkeitsdefizit gegen die Umgebung vorhanden und das Blatt kann transpirieren. Aus der Temperatur der Bodenschichten tiefer als 20 cm lässt sich die Berechnung der Temperaturleitfähigkeit der Nachweis erbringen, daß in dieser Tiefe die Schichten noch durchfeuchtet sind.

**Summary.** A cultivation of tobacco of 5 ha has been artificially irrigated every night with a precipitation of 8-10 mm. The increase in gross receipts almost three times justifies the cost of the irrigation installation and detailed microclimatic investigations.

In the climate caused in a closed cultivation by irrigation all the extremes are moderated. The daily variation of temperature gets smaller, the humidity remains higher and the soil is moistened around the roots. The humidity in the cultivation remains always above 45%, whereas it falls below this for  $7\frac{1}{2}$  hours in the not irrigated surrounding. The temperature of a tobacco leaf amidst a cultivation generally differs but little from the temperature of the surrounding air and falls only for a short time below dew point tem-