

## Lüftungsmessungen mit radioaktiven Isotopen

Aus dem Laboratorium f. Techn. Physik d. Technischen Hochschule München Von Hans Al. Willea und Heinz Maier-Leibnitz

Die Entlüftung künstlich ventillierter, geschlossener Räume wurde dadurch untersucht, daß die Raumluft mit Radiumemanation indiziert und die Abnahme der Radioaktivität durch wiederholte Probenentnahmen an verschiedenen Orten verfolgt wurde. Das Ergebnis stimmt nur dann mit der üblichen Strömungsmessung an der Abluft überein, wenn die Raumluft dauernd gleichmäßig durchmischt wird. Zur Beschreibung der Abweichungen wird eine neue Meßgröße, der Entlüftungsfaktor, definiert. Die Brauchbarkeit der Methode wird an Hand einiger Versuchsbeispiele aufgezeigt.

Zur Beurteilung von Luftaustauschvorgängen in geschlossenen Räumen wird meist die Luftwechselzahl durch Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in den Zu- bzw. Abluftschächten der Lüftungsanordnung bestimmt. Diese Methode kann jedoch aus zwei Gründen unrichtige Ergebnisse liefern, weil erstens ein Luftein- oder -austritt durch Undichtigkeiten, Türen, Fenster usw. nicht berücksichtigt wird und zweitens durch nichtvollständige Durchmischung der Raumluft mit der Frischluft besonders bei größeren Räumen die Lüftungswirkung durch die Luftwechselzahl allein nicht beurteilt werden kann. Bei der Indikatormethode wird durch Beimengung einer leicht quantitativ nachweisbaren gasförmigen Substanz, etwa Kohlensäure, ein bestimmter Luftanteil gekennzeichnet und die zeitliche Änderung der Indikatorkonzentration im Raum zur Beurteilung der Lüftungswirkung herangezogen. Im allgemeinen ändert sich durch den Indikatorzusatz die Dichte des Gases. Dies kann manchmal ausgenützt werden, indem man damit eine Erwärmung oder Abkühlung simuliert. Oft ist es jedoch auch störend. Bei einer Indizierung mit radioaktiven Isotopen ist die Menge der zugesetzten Fremdelemente weit unter 1 Mikrogramm; Dichteänderungen treten also nicht auf. Die wachsende technische Verwendung von Isotopen und die gut ausgebildete Meßtechnik ermöglichen heute eine ausgedehnte Anwendung dieser Methode auch bei Lüftungsmessungen<sup>1)</sup>. Es ist damit ohne großen technischen Aufwand möglich, die Lüftungswirkung an verschiedenen Punkten innerhalb des Raumes getrennt zu untersuchen und damit die effektive Wirksamkeit einer Lüftungsanordnung zu beurteilen, und zwar unabhängig von einer Kenntnis des Wegs der Zu- oder Abluft. Für das Gebiet der Raumlüftung bedeutet dies eine große grundsätzliche Erweiterung der Meßmöglichkeiten. Die vorliegende Untersuchung wurde mit dem Ziel unternommen, an einigen einfacheren Versuchsbeispielen die Möglichkeiten der Indikatormethode zu erläutern.

### Zur Meßmethode

Für Lüftungsmessungen kommen als Radioisotope, die in der Gasform als Element oder Verbindung beständig und nicht leicht absorbierbar sind, im wesentlichen die folgenden in Frage: Die Edelgase Kr<sup>85</sup>, Xe<sup>133</sup> und Radiumemanation, ferner Br<sup>82</sup> als Äthylendibromid<sup>1)</sup>, vielleicht C<sup>14</sup> als CO<sub>2</sub> und schließlich die kurzlebigen Isotope C<sup>11</sup> und N<sup>13</sup> (Halbwertszeit 20 und 10 Minuten). Kr<sup>85</sup>, Xe<sup>133</sup>, Br<sup>82</sup> und C<sup>14</sup> können im Pile hergestellt und etwa aus England in hohen Aktivitäten bezogen werden. Radiumemanation (Halbwertszeit 3,8 Tage) entsteht laufend aus Radium und ist in Mengen bis ca. 100 mC leicht erhältlich. Zur Messung sind seine Folgeprodukte wichtig, die innerhalb einer Stunde immer neu entstehen und zerfallen. Sie können leicht aus einem größeren Luftvolumen gesammelt werden<sup>2)</sup>. Die Isotope C<sup>11</sup> und N<sup>13</sup> können mit Teilchenbeschleunigern hergestellt und wegen der kurzen Lebensdauer nur am Ort der Herstellung verwendet werden. (Der Versuch darf nicht länger als ca. 10 Halbwertszeiten dauern.)

<sup>1)</sup> Seligman, R.: Production and Uses of Radioisotopes. Nature 171 (1953), Nr. 4353, S. 588.

<sup>2)</sup> Israel, H.: Radioaktivität. I. A. Barth-Verlag 1938, S. 98.

Der Nachweis der Strahlung kann auf verschiedene Weise erfolgen: Es können im untersuchten Raum oder im Weg der Zu- oder Abluft Beta-Zählrohre aufgestellt werden, die je nach Art der Strahlung ein effektives Luftvolumen um das Zählrohr erfassen, dessen Radius um 10 bis 50 cm liegt. Oder es können Luftproben entnommen und nacheinander mit einem Zählrohr außerhalb des Raumes untersucht werden. Bei Radiumemanation kann man die Folgeprodukte aus entnommenen Luftproben auf einer Metallelektrode sammeln und entweder ihre Beta- oder Alphastrahlen messen. Schließlich kann man die Folgeprodukte bei Absaugen der Luft durch Filter auf diesen konzentrieren<sup>3)</sup> und die Betaaktivität der Filter messen. Bei Kohlensäure wäre eine Abscheidung ebenfalls leicht möglich. C<sup>14</sup> ist wegen seiner weichen Strahlung nicht bequem zu messen. Die kleinsten noch meßbaren Konzentrationen der aktiven Isotope in Luft liegen in der Größenordnung von 10<sup>-6</sup> mC pro Liter Luft. Die verschiedenen obengenannten Methoden unterscheiden sich hierin nicht viel mehr als eine Zehnerpotenz, nur beim Absaugen durch Filter erreicht man viel höhere Empfindlichkeit. Zur möglichen Schädigung durch die radioaktiven Strahlungen ist zu sagen, daß die dauernd erlaubte Konzentration in Luft, von Isotop zu Isotop stark verschieden, bis herab zu etwa 10<sup>-7</sup> mC pro Liter Luft (bei Radiumemanation) angegeben wird<sup>4)</sup>. Für kurz dauernde Versuche sind höhere Aktivitäten unbedenklich. Man wird es vielleicht vermeiden, sich während der Versuche in den aktivierten Räumen dauernd aufzuhalten. Bei der Behandlung der Ausgangssubstanzen, deren Aktivität viele mC betragen kann, sind die allgemeinen Vorschriften des Strahlungsschutzes zu beachten<sup>5)</sup>.

Aus Gründen der Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit wurde von uns Radiumemanation als Indikatorgas verwendet. Es wurde eine relativ einfache und daher für die Praxis brauchbare Methode entwickelt, Radiumemanationskonzentrationen im Bereich von 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-7</sup> mC pro Liter, also ca. 10<sup>-12</sup> bis 10<sup>-15</sup> g pro Liter Luft mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 3 bis 5 vH vergleichend zu messen. Diese Methode wurde in Laboratoriumsversuchen überprüft und praktisch bei Lüftungsmessungen in einem Versuchsraum sowie zur Untersuchung thermisch wirkender Entlüftungsanlagen bei innen liegenden sanitären Räumen angewendet.

### Die Messung kleiner Emanationskonzentrationen bei Luftwechselvorgängen

Die Konzentrationsproben werden mittels vorher evakuierter Ein-Liter-Glaskolben aus dem zu untersuchenden Luftraum entnommen. Damit ist die Untersuchung am Versuchsort abgeschlossen. Im Laboratorium erfolgt die sogen. Aktivierung. Hierzu wird jeweils die Hälfte der betreffenden Luft-

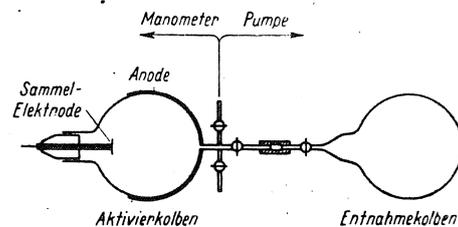


Bild 1. Aktivieranordnung (schematisch).

<sup>3)</sup> Haxel, O. u. Schumann, A.: Über die radioaktive Verseuchung der Atmosphäre. Naturwissenschaften 40 (1953), H. 17, S. 458.

<sup>4)</sup> Zimen, K. E.: Angewandte Radioaktivität. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1952, S. 85.

<sup>5)</sup> Schubert, G.: Kernphysik und Medizin. Verlag Muster-Schmidt, Göttingen 1947, S. 273.

probe in einen vorher ebenfalls evakuierten Aktivierkolben (vergleiche Bild 1) übergeführt. Bei Anlegen einer hohen Gleichspannung zwischen der blättchenförmigen Sammelelektrode und der großflächigen Anode, die an der Außenseite des Aktivierkolbens angebracht ist, wird der aktive Niederschlag der Radiumemanation auf der Elektrode stark angereichert. Er besteht aus den positiv geladenen radio-

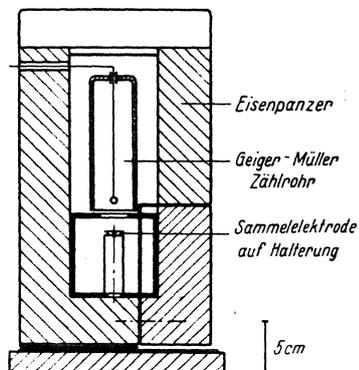


Bild 2. Anordnung zur Messung der Elektrodenaktivitäten. Der Eisenpanzer dient zur Abschirmung radioaktiver Strahlung aus der Umgebung.

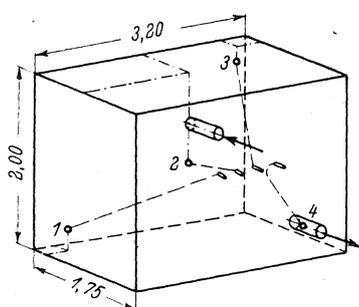


Bild 3. Schematische Darstellung des Versuchsaumes. Luftführung und Entnahmestellen wie in Versuch 1, 2 und 3.

aktiven Folgeprodukten der Emanation, im wesentlichen RaB und RaC. Nach einer bestimmten Aktivierzeit, die für alle Vergleichsmessungen gleich sein muß, wird die Sammelelektrode aus dem Kolben entfernt und ihre Betaaktivität, die von RaB und RaC herrührt, mit einer Geiger-Müller-Zähleinrichtung gemessen. Die in einem bestimmten Zeitintervall registrierte Impulszahl ist bei nicht zu hohen Emanationskonzentrationen unmittelbar ein Maß für die Emanationsmenge, die zu Beginn der Aktivierung im Aktivierkolben vorhanden war. Unter gleichen Versuchsbedingungen und unter Berücksichtigung des zeitlichen radioaktiven Zerfalls der Radiumemanation können somit die Konzentrationen verglichen werden. Die Genauigkeit dieser Vergleichsmessungen wird hauptsächlich beeinflusst durch die statistische Verteilung der Betaimpulse. Sie erhöht sich mit der Impulshäufigkeit, also mit der Ausgangskonzentration, der Radiumemanation. Ihre obere Grenze ist festgelegt durch das Auflösungsvermögen der Zählapparatur. Bei Verwendung der in Bild 2 skizzierten Meßanordnung unter Benützung einer Geiger-Müller-Zähleinrichtung PW 4020 — GM 4810 von Philips mit dem zugehörigen Zählrohr 18514 beträgt die maximal erreichbare Meßgenauigkeit etwa 2,5 vH für die Einzelmessungen, wenn die Elektroden bei 2000 V 45 Minuten aktiviert werden und eine Meßzeit von sieben Minuten eingehalten wird. Eine Anordnung von vier voneinander unabhängig benutzbaren Aktivierkolben gestattet es, die Aktivierungen, Messungen und Nulleffektmessungen in ununterbrochener Reihenfolge durchzuführen, so daß bei längeren Meßreihen jede Einzelkonzentrationsmessung durchschnittlich 20 Minuten in Anspruch nimmt. Unter den angegebenen Versuchsbedingungen entspricht eine Konzentration von  $1,0 \cdot 10^{-5}$  mC pro Liter 6000 Zählrohrimpulsen in sieben Minuten, d. h. einer mittleren Impulshäufigkeit von 860 Impulsen pro Minute. Um die zeitliche Konzentrationsabnahme im Versuchsraum bequem verfolgen zu können, wird die zur Indizierung dienende Menge Radiumemanation so bemessen, daß die Ausgangs-

konzentration etwa  $1$  bis  $3 \cdot 10^{-5}$  mC pro Liter beträgt. Der zeitliche Konzentrationsverlauf kann dann ohne Schwierigkeit an Hand von acht bis zehn Konzentrationsproben bis auf 5 bis 10 vH der Ausgangskonzentration gemessen werden, was in den meisten Fällen der Praxis als vollauf ausreichend anzusehen ist.

**Anwendungsbeispiele**

In einem besonderen Versuchsraum, der in der Größe und in der Anordnung der Zuluft- bzw. Abluftöffnungen speziellen Untersuchungsobjekten (innen liegende sanitäre Räume) angepaßt war, wurden mehrere grundlegende Versuche ausgeführt, die über die praktische Anwendbarkeit einer derartigen Methode zu Lüftungsuntersuchungen Aufschluß geben sollten. Die Abmessungen des Versuchsraumes sind aus Bild 3 ersichtlich. Sein Gesamtvolumen beträgt  $11,3 \text{ m}^3$ . Er wurde nach außen gut abgedichtet, um einen unkontrollierbaren Luftwechsel weitgehend zu vermeiden. Die Anordnung von Zu- und Abluftführung wurde so getroffen, daß durch Ansatz passender Rohrstücke (Durchmesser 10 cm) die geometrische Lage von Zu- und Abluftöffnung einfach verändert werden konnte. In den in Bild 3 mit den Ziffern 1, 2, 3 und 4 gekennzeichneten Raumpunkten lagen die Öffnungen sehr feiner nach außen führender Rohrsonden, so daß die einzelnen Konzentrationsproben an diesen Stellen ohne Störung für die Luftwechsellvorgänge von außen entnommen werden konnten. Die Entnahmestelle 4 lag im Abluftkanal, kurz hinter der Abluftöffnung. Der Raum konnte durch beliebig aufstellbare elektrische Heizkörper beheizt werden. Zur Messung der räumlichen Temperaturverteilung wurden an den Entnahmestellen Thermoelemente angebracht. Die regulierbare Entlüftung erfolgte durch ein Gleichstromschleuderrad-Gebläse, welches die Abluft durch den Kanal ansaugte und durch eine geeichte Gasuhr und eine Geschwindigkeitskontrollstrecke mit eingebautem Flügelrad- bzw. Differential-Hitzdrahtanemometer ins Freie beförderte. Bei den zunächst beschriebenen Versuchen wurde folgendes Meßverfahren angewendet:

Einige Minuten vor Beginn des Entlüftungsvorgangs wurden ca. 0,2 bis 0,3 Millicurie Radiumemanation in den Raum gebracht und durch kräftiges Fächeln im Luftraum gleichmäßig verteilt. Nachdem die Entlüftungsanlage in Aktion gesetzt

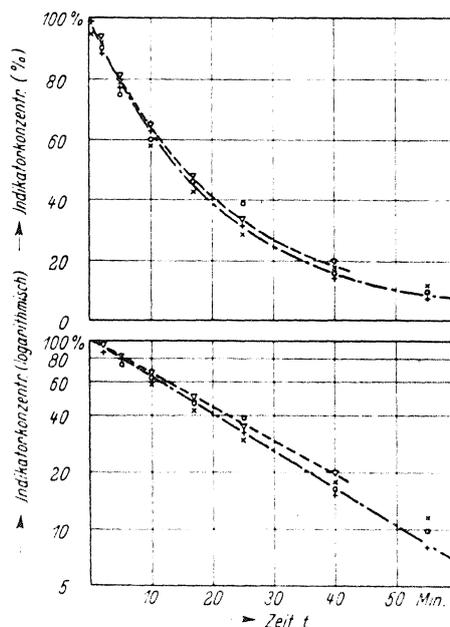


Bild 4. Zeitl. Verlauf der Indikatorkonzentration bei Versuch 1.

Es bedeutet bei allen Versuchen:

- x Punkt 1, — o Punkt 2 (Raummitte), ... + Punkt 3,
- ▽ Punkt 4 (Abluft), — · — · homog. Durchm. in der Abluft  $c'$ , sowie bei homogener Durchmischung  $\bar{c}$  in linearem und logarithmischem Maßstab. Probeentnahmen bei  $t = 0, 2, 5, 10, 17, 25, 40$  u.  $55$  Min. Zeitl. Durchflußmenge  $Q = 8,8 \text{ l/sec} \pm 0,5 \text{ vH}$ . Berechnete Luftwechselzahl  $a = 2,8 \text{ h}^{-1} \pm 1,5 \text{ vH}$ . Mittl. Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ ): Raum 19,9, Zuluft 16,5, Abluft 19,0.

war, wurden in zeitlichen Abständen von 2 bis 20 Minuten die Konzentrationsproben an den Punkten 1, 2, 3 und 4 gleichzeitig mittels der evakuierten Entnahmekolben durch die Meßsonden von außen entnommen. Als Ausgangs- und Vergleichskonzentrationen galten jeweils die unmittelbar nach Einschalten der Entlüftung entnommenen Proben. Die Konzentrationsbestimmung nach oben erläuterten Verfahren wurde durchschnittlich ein bis vier Stunden nach dem Entlüftungsversuch vorgenommen. Zur Auswertung wurden alle gemessenen Konzentrationswerte auf die Ausgangskonzentration (100 vH) bezogen, unter Berücksichtigung des zeitlichen Zerfalls der Emanation. Im folgenden werden einige Versuche aus einer größeren Reihe beschrieben. Die Meßergebnisse sind in den Bildern 4 bis 9 zusammengefaßt.

**Versuch 1 (Bild 4)**

Um in dem Raum eine kräftige Konvektion und damit eine gute Durchmischung der Frischluft mit der Altluft möglichst im ganzen Volumen zu erhalten, war vor der Zuluftöffnung am Boden ein elektrischer Heizkörper mit einer Leistungsaufnahme von 1000 Watt aufgestellt.

**Versuch 2 (Bild 5)**

Der Versuchsraum wurde während der Versuchsdauer nicht geheizt. Raumtemperatur und Zulufttemperatur unterscheiden sich nicht.

**Versuch 3 (Bild 6)**

Die Frischluft wurde durch eine elektrische Heizvorrichtung auf ca. 35 bis 40° erwärmt und dem Raum oben zugeführt.

**Versuch 4 (Bild 7 und 8)**

Die Luftzuführung wurde nach unten, die Abluftöffnung nach oben verlegt (Bild 7). Der Versuchsraum wurde während der Dauer des Versuchs nicht beheizt. Raumtemperatur und Zulufttemperatur unterscheiden sich nicht.

**Versuch 5 (Bild 9)**

Um die zeitliche und räumliche Ausbreitung einer, an einer bestimmten Stelle in den Raum gebrachten gasförmigen Verunreinigung festzustellen, wurde die Anordnung nach Bild 9 umgebaut, eine kleine Menge Emanation (0,2 mC) an der in der Skizze bezeichneten Stelle, etwa in der Mitte des Raumes in Bodennähe eingebracht und nicht gleichmäßig verteilt, dagegen unmittelbar darauf die Lüftung eingeschaltet.

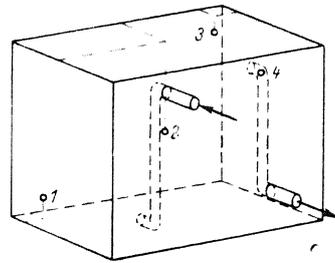


Bild 7. Anordnung der Zu- und Abluftöffnung, sowie der Entnahmestellen bei Versuch 4 (schematisch).

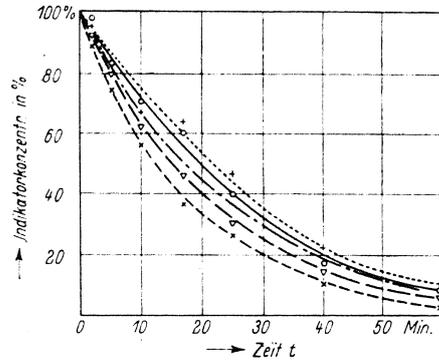


Bild 8. Zeitl. Verlauf der Indikatorkonzentrationen bei Zuführung der Frischluft im unteren Drittel des Raumes (Versuch 4). Probeentnahmen bei  $t = 0, 2, 5, 10, 17, 25, 40$  u.  $60$  Min. Zeitl. Durchflußmenge  $Q = 7,8 \text{ l/s} \pm 1 \text{ vH}$ . Berechnete Luftwechselzahl  $a = 2,45 \text{ h}^{-1} \pm 2 \text{ vH}$ . Mittl. Temp.: Raum = Zuluft = Abluft =  $17,8^\circ \text{C}$ .

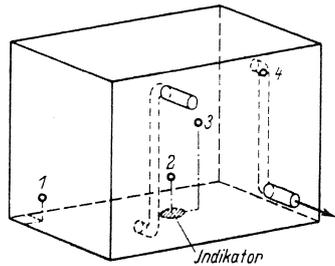


Bild 9. Anordnung der Zu- und Abluftöffnung, sowie der Entnahmestellen bei Versuch 5. Die Emanation wurde an der bezeichneten Stelle eingebracht, aber nicht gleichmäßig verteilt.

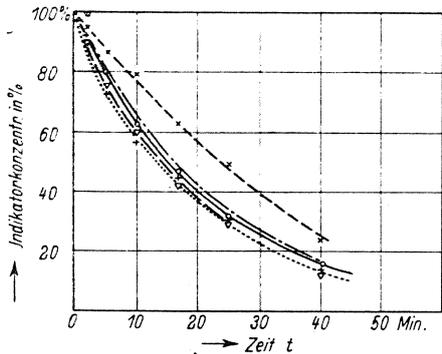


Bild 5. Zeitl. Verlauf der Indikatorkonzentrationen bei Versuch 2, gemessen an den verschiedenen Raumpunkten, sowie im Fall homogener Durchmischung. Probeentnahmen bei  $t = 0, 2, 5, 10, 17, 25$  u.  $40$  Min. Zeitl. Durchflußmenge  $Q = 8,1 \text{ l/s} \pm 0,4 \text{ vH}$ . Berechnete Luftwechselzahl  $a = 2,6 \text{ h}^{-1} \pm 1,5 \text{ vH}$ . Mittl. Temp. Raum = Zuluft = Abluft =  $17,2^\circ \text{C}$ .

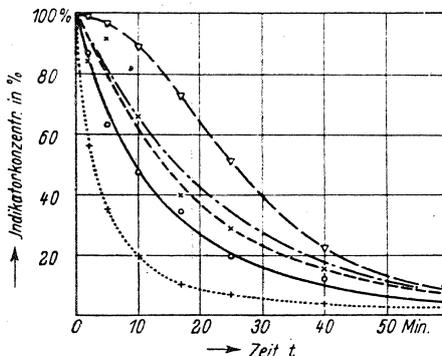


Bild 6. Zeitl. Verlauf der Indikatorkonzentrationen bei Zuführung von Warmluft (Versuch 3). Probeentnahmen bei  $t = 0, 2, 5, 10, 17, 25, 40$  u.  $60$  Min. Zeitl. Durchflußmenge  $Q = 7,8 \text{ l/s} \pm 0,8 \text{ vH}$ . Berechnete Luftwechselzahl  $a = 2,5 \text{ h}^{-1} \pm 1,8 \text{ vH}$ . Mittl. Temp. ( $^\circ \text{C}$ ): Pkt. 1 =  $16,9$ , Pkt. 2 =  $18,7$ , Pkt. 3 =  $21,8$ , Zuluft  $37,8$ , Abluft  $17,0$ .

**Diskussion der Ergebnisse**

Findet in dem gesamten Raum gleichmäßig homogene Durchmischung der Altluft mit der zugeführten Frischluft statt, so fällt unter der Voraussetzung, daß nur Altluft durch den Indikator gekennzeichnet ist, die Konzentration  $c$  im ganzen Raum gleichmäßig exponentiell ab.

$$c = c_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V} \cdot t\right) \dots \dots \dots (1)$$

$c$  = Konzentration,  $c_0$  = Konzentration zur Zeit  $t = 0$ .  
 $Q$  = zeitliche Durchflußmenge,  $V$  = Volumen des Raumes.

Auch die im Abluftkanal auftretende Konzentration  $c'$  gehorcht dann dieser Gesetzmäßigkeit.

Wird in Gleichung 1 als Zeiteinheit die Stunde benützt, so ist die Größe  $Q/V$  gleich der allgemein gebräuchlichen Luftwechselzahl  $a$ .

Unter der Annahme homogener Durchmischung läßt sich also aus dem Konzentrationsverlauf die Luftwechselzahl  $a$  bestimmen nach der Beziehung

$$a = \frac{\ln c_0/c}{t} \dots \dots \dots (2)$$

Voraussetzung hierzu ist, daß die zeitliche Durchflußmenge über die Meßzeit  $t$  als konstant angesehen werden kann. Dann gelten die Gleichungen 1 und 2 auch, wenn ein in Strömungsmessungen nicht erfassbarer Luftwechsel durch Undichtigkeiten usw. stattfindet. Vielfach jedoch wird auf Grund besonderer Strömungsvorgänge im Inneren des Raumes keine

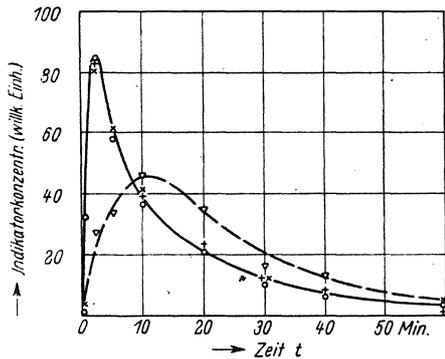


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der Indikatorkonzentrationen (Versuch 5) in Punkt 1, 2 und 3, sowie im Abluftkanal (4) bei Indizierung einer bestimmten Stelle im Raum. Probenentnahmen bei  $t = 0, 2, 5, 10, 20, 30, 40$  u.  $60$  Min. Zeitl. Durchflußmenge  $Q = 7,7 \text{ l/s} \pm 1 \text{ vH}$ . Luftwechselzahl  $a = 2,45 \text{ h}^{-1} \pm 2 \text{ vH}$ . Mittl. Temp.: Raum  $17,7$ , Zuluft  $17,4$ , Abluft  $17,6^\circ \text{C}$ .

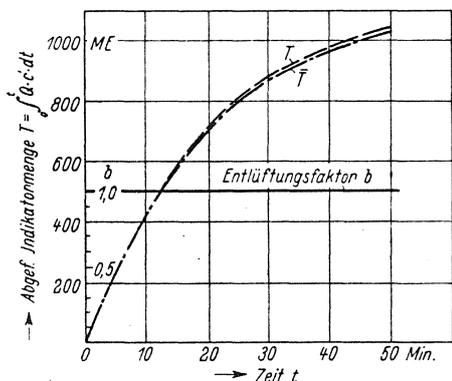


Bild 11. Die bis zur Zeit  $t$  aus dem Raum entfernte Indikatormenge  $T$  bzw.  $\bar{T}$ , gewonnen durch graphische Integration der Konzentrationskurven  $c'$  bzw.  $\bar{c}'$  in Bild 4 (Versuch 1). Dazu der Entlüftungsfaktor  $b = T/\bar{T}$ . Ordinate der Integralkurven in willk. Mengeneinheiten (ME). Maßstab: 1 Mengeneinheit (ME) /  $\text{m}^3$  entspricht einer Konzentration von 1 vH der Ausgangskonz. in Bild 4.

vollkommene Durchmischung stattfinden. Unter der Annahme, daß der Luftwechsel praktisch vollkommen durch die Entlüftungsanlage vor sich geht, kann aber die bei einer bestimmten Anordnung erzielte Lüftungswirkung recht gut beurteilt werden, wenn man die Indikatorkonzentration im Abluftkanal vergleicht mit der Konzentration, wie sie auf Grund der Strömungsgeschwindigkeit im Fall homogener Durchmischung (Gl. 1) zu erwarten wäre. Wir möchten vorschlagen, zur Beschreibung dieser Vorgänge den Entlüftungskoeffizienten  $b$  einzuführen, der definiert ist nach der Gleichung:

$$b = \frac{T}{\bar{T}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q \cdot c' \cdot dt}{\int_{t_1}^{t_2} Q \cdot \bar{c}' \cdot dt} \quad (3)$$

$T$  = die in der Zeit ( $t_2-t_1$ ) tatsächlich abtransportierte Indikatormenge,  
 $\bar{T}$  die in derselben Zeit im Fall homogener Durchmischung abgeführte Menge,  
 $c'$  = Abluftkonzentration,  
 $\bar{c}'$  = Abluftkonzentration im Fall homogener Durchmischung.

$b$  gibt also an, wieviel mal mehr Verunreinigung bei dem betreffenden Lüftungsvorgang in einer bestimmten Zeit abtransportiert wird als bei gleicher zeitlicher Luftdurchflußmenge, aber gleichmäßiger Durchmischung im ganzen Raum. Der Entlüftungsfaktor kann bei konstanter Durchflußmenge  $Q$  unmittelbar aus den Integralkurven der beiden Konzentrationen  $c'$  und  $\bar{c}'$  abgelesen werden. Er ist im allgemeinen zeitabhängig. Aus seiner Größe und seinem Verlauf können wichtige Rückschlüsse auf die im Raum stattfindenden Vorgänge gezogen werden. So deutet  $b > 1$  darauf hin, daß neben einem Durchmischungsvorgang auch ein Ver-

drängungsvorgang im Raum stattfinden muß, der bewirkt, daß die Frischluft die Altluft sozusagen vor sich herschiebt,  $b < 1$  dagegen zeigt an, daß ein Teil der Frischluft wenig vermischt den Raum durch den Abluftkanal wieder verläßt. Im Extremfall passiert ein Teil der Frischluft den Raum in geschlossenem Strom. Zeigt  $b$  ein Maximum bzw. ein Minimum bei konstanter Durchflußmenge  $Q$ , so ist daraus zu schließen, daß nach bestimmter Zeit ein Teilvorgang abgeschlossen ist und eventuell durch einen anderen Vorgang ersetzt wird. Konzentrationsmessungen an verschiedenen Punkten des Rauminnen geben zusammen mit dem Entlüftungsfaktor ein recht gutes Bild der Luftwechselforgänge die je nach Geometrie des Raumes und der Lüftungsanordnung besonders bei größeren Räumen sehr unterschiedlich verlaufen können.

In Versuch 1 wurde homogene Durchmischung durch Erzeugen einer starken Konvektionsströmung erzielt. Die Konzentrationen in den Raumpunkten 1, 2 und 3 und im Abluftkanal 4 weichen nicht wesentlich von dem Konzentrationsverlauf  $\bar{c}'$  (theoretische homogene Durchmischung) ab. In Bild 11 sind die Integralkurven der Konzentrationen  $c'$  und  $\bar{c}'$  dargestellt. Sie verlaufen praktisch identisch. Der Entlüftungsfaktor  $b$  bleibt ungefähr konstant gleich 1.

Bei Versuch 2 nimmt die Indikatorkonzentration in Punkt langsamer ab. Das Gebiet um 1 wird also hier weniger gut belüftet. Der Konzentrationsverlauf  $c'$  im Abluftschach liegt etwas unterhalb des theoretisch bei homogener Durchmischung erwartbaren  $\bar{c}'$ . Der Entlüftungsfaktor  $b$  ist somit kleiner als 1 (Bild 12), was darauf hindeutet, daß ein Teil der Frischluft den Raum verläßt, ohne seine volle Lüftungswirkung erreicht zu haben. Der Luftaustauschvorgang kann hier etwa folgendermaßen beurteilt werden: Die oben zugeführte Frischluft, die sich in der Dichte von der Raumluft nicht unterscheidet (gleiche Temperaturen), verteilt sich im Raum unter Bevorzugung eines höheren Bereichs. (Som-

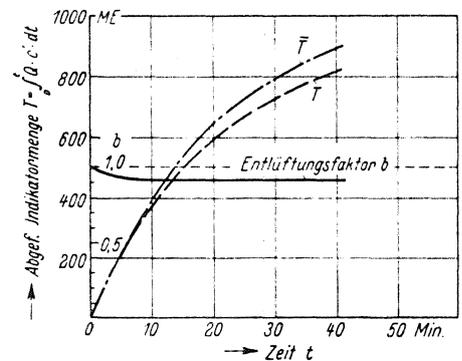


Bild 12. Abgeführte Indikatormenge  $T$  bzw.  $\bar{T}$  und Entlüftungsfaktor  $b$  bei Versuch 2. Maßstab wie 11.

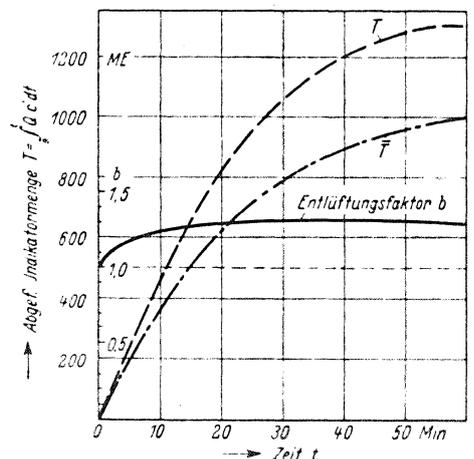


Bild 13. Abgeführte Indikatormenge  $T$  bzw.  $\bar{T}$  und Entlüftungsfaktor  $b$  bei Zuführung erwärmter Frischluft im oberen Drittel Raumes (Versuch 3). Maßstab wie 11.

müßte 1 besser belüftet werden.) Ein glattes Durchströmen eines Teiles der Frischluft dürfte wohl nicht vorliegen, da dann die Lüftungswirkung vor allem auch in Punkt 3 wesentlich schlechter sein müßte.

Bei Zuführung von Warmluft im oberen Raumteil (Versuch 3) verlaufen die Konzentrationen in den Punkten 1, 2 und 3 stark verschieden. Die effektive Lüftungswirkung in Punkt 1 ist wesentlich geringer als in Punkt 2 und 3, dennoch aber stärker als bei homogener Durchmischung. Der Entlüftungsfaktor  $b$  (Bild 13) zeigt nach 35 Minuten ein Maximum und beträgt im Mittel 1,25, d. h. die effektive Lüftungswirkung ist in diesem Fall ca. 25 vH größer als bei homogener Durchmischung. Aus diesen Ergebnissen läßt sich schließen, daß bei Versuch 3 in einem Teil des Raumes, offensichtlich im oberen Raumgebiet eine Art Verdrängungsvorgang stattfindet. (Konzentrationsverlauf in Punkt 3!) Die Konzentrationskurven in Punkt 1 und in Raummitte (Punkt 2) zeigen durch ihren angenähert exponentiellen Verlauf einen Durchmischungsvorgang an. Man erhält folgendes Bild für diesen speziellen Luftwechselvorgang: Die um ca. 18°C gegenüber der Raumluft erwärmte Frischluft breitet sich zum Großteil in gleichmäßiger Schicht unter der Raumdecke aus und verdrängt dort die Altluft, ohne sich wesentlich mit ihr zu vermischen. Die Schicht wächst langsam bis auf ca. ½ m an, so lange, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, und die durch Abkühlung an der Decke und an den Wänden aus diesem Volumen in die unteren Raumteile entweichende Luft gerade durch Neuzufuhr ersetzt wird (nach ca. 35 Minuten). Im unteren Raumteil findet relativ gute Durchmischung statt, da ein Teil der Frischluft unmittelbar eine Durchwirbelung hervorruft und dauernd ein bestimmter Anteil aus dem Verdrängungsvolumen durch Abkühlung nach unten gelangt.

Bei umgekehrter Luftführung (Versuch 4) nimmt die Indikatorkonzentration im unteren Raumteil (Punkt 1) schneller ab als in den Punkten 2 und 3. Die Konzentration im Abluftkanal verläuft außerdem stets unter der bei homogener Durchmischung erwartbaren. Der Entlüftungsfaktor  $b$  ist  $< 1$  (Bild 14) etwa 0,9. Es liegen offenbar ähnliche Verhältnisse vor wie in Versuch 2, mit dem Unterschied, daß hier die Lüf-

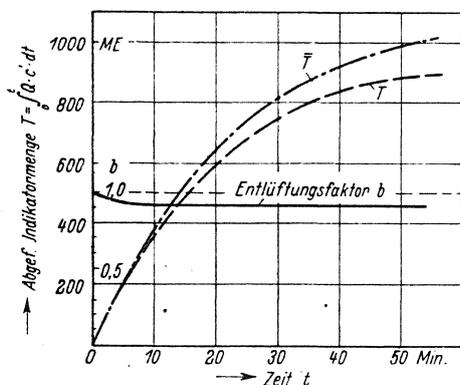


Bild 14. Abgeführte Indikatormenge  $T$  bzw.  $\bar{T}$  und Entlüftungsfaktor  $b$  bei Zuführung der Frischluft im unteren Raumdrittel (Versuch 4). Maßstab wie 11.

twirkung im unteren Raumgebiet stärker ist, ein verständliches Ergebnis, da ja die Frischluft ohne Temperaturunterschied im unteren Raumgebiet zugeführt wird.

Die Ergebnisse aus Versuch 5 geben Aufschluß über die räumliche und zeitliche Verteilung von Verunreinigungen, die nur an einem bestimmten Ort im Raum entstehen und lassen sich zur Beurteilung der betreffenden Lüftungsanordnung ebenfalls verwenden.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse zeigt, daß in unserem Beispiel eines sehr kleinen Raumes im allgemeinen die Berechnung der Luftwechsellzahlen an Hand eines einzigen Konzentrationsverlaufes, nämlich des in Raummitte gemessenen, mit guter Genauigkeit ausgeführt werden kann (Ausnahme z. B. Versuch 3). Dieser Verlauf weicht unter einigermaßen normalen Verhältnissen nicht wesentlich von der Konzentration bei homogener Durchmischung ab, obwohl diese sicher nicht immer erreicht ist.

#### Zusammenfassung

Alle in diesem Zusammenhang ausgeführten Versuche waren lediglich darauf ausgerichtet, die technische Anwendbarkeit der Indikatorermethode mit Radiumemanation zu untersuchen. Sie lieferten insgesamt folgende Ergebnisse:

1. Es gelingt in nicht zu großen Räumen die Emanation bei einer durchschnittlichen Konzentration von 0,01 bis 0,03 mC pro m<sup>3</sup> im Luftraum gleichmäßig zu verteilen. Entmischung oder ein merklicher Konzentrationsverlust durch Adsorption tritt nicht auf.
2. Die Rn-Konzentration kann bei den gewählten Ausgangskonzentrationen von 1 bis  $3 \cdot 10^{-5}$  mC/l in dem entwickelten Meßverfahren über mindestens eine Zehnerpotenz mit einer Genauigkeit der Einzelmessung von ca. 3 vH und über eine weitere Zehnerpotenz mit einer Genauigkeit von 5 bis 7 vH an verschiedenen Stellen des Raumes gemessen werden, wobei die eigentlichen Konzentrationsmessungen nicht an den Versuchsort gebunden sind.
3. Die Indikatorermethode liefert eindeutige Ergebnisse, die in nachprüfbareren Fällen innerhalb der Meßgenauigkeit mit den aus der Theorie abgeleiteten Resultaten übereinstimmen.
4. In allen Fällen, bei welcher keine homogene Durchmischung von Alt- und Frischluft stattfindet, läßt sich zur Beschreibung der Luftwechselvorgänge ein neuer Begriff, der Luftwechselfaktor  $b$ , neben der Luftwechsellzahl  $a$  mit Vorteil verwenden.
5. Die Luftwechsellzahl  $a$  kann unter bestimmten, jedoch in kleinen Räumen meist zutreffenden Bedingungen mit einer Genauigkeit von ca. 5 vH ohne Strömungsmessungen ermittelt werden.
6. Es ist möglich, die räumliche Ausbreitung einer Luftverunreinigung unter gegebenen Verhältnissen zu untersuchen und damit spezielle Lüftungsanordnungen zu beurteilen. Unsere Arbeit behandelt nur das einfache Beispiel von Räumen mit bekannter Zu- und Abluftführung, wobei noch durch die Kleinheit des Versuchsraumes relativ einfache Verhältnisse vorlagen. Für kompliziertere Verhältnisse, besonders mit undefinierter Luftführung, dürfte die Methode so große Möglichkeiten bieten, daß ihre häufige Anwendung in der Lüftungstechnik geboten erscheint.

Anschr. d. Verf.: München 2, Arcisstr. 21

## Das Behaglichkeitsfeld im beheizten Raum

Von A. Kollmar, Berlin

Der Verlauf der Raumlufttemperaturen bei der Radiatoren- und Deckenheizung im senkrechten und waagerechten Schnitt durch den Raum ist schon vor vielen Jahren dargestellt<sup>1)</sup> und auch in späteren Abhandlungen öfter gebracht worden. In der unmittelbaren konvektiven Auswirkung der Raumluft auf den Menschen sind die Raumlufttemperaturen über 2 m Raumhöhe praktisch einflußlos und darunter —

in der Aufenthaltszone des Menschen — läßt die Lufttemperatur bei gleichmäßig waagerechtem und annähernd senkrechtem Verlauf die empfundene Temperatur unverändert, ganz gleich, welchen Standort der Mensch im Raum einnimmt. Zur Behaglichkeit muß natürlich die Raumlufttemperatur in der richtigen Größenordnung liegen, z. B. 20°C bei der Radiatorenheizung. Eine Zunahme im senkrechten Verlauf der Raumlufttemperatur über etwa 2,8°C, gemessen in Fußknöchel- und Kopfhöhe, wirkt sich bereits für den Kopf nachteilig aus. Eine in Kopfhöhe niedrigere

<sup>1)</sup> Settele, E.: Über die Auswirkung verschiedener Heizungsanordnungen auf die Temperaturverteilung im Raum. Ges.-Ing. 56 (1933), S. 505/09.