GESUNDHEITS-INGENIEUR

30. Heft 28. Juli 1928 51. Jahrgang

Die Luftdurchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionsteilen.[1])

Von **E. Raisch**, München.

Die Luftdurchlässigkeit der Baustoffe wurde erstmals mit Rücksicht auf ihre für die Lufterneuerung in Räumen in Frage kommende hygienische Bedeutung einer näheren Betrachtung unterzogen; es liegen hierüber die Veröffentlichungen von v. Pettenkofer vor. Durch seinen bekannten Versuch, mit dem durch einen Ziegelstein gedrückten Luftstrom ein Licht auszublasen, hat er die Luftdurchlässigkeit dieses Baustoffes veranschaulicht, von ihm stammt auch der so oft angeführte Ausspruch über das »Atmen der Wände«. Diesbezügliche weitere Versuche wurden von C. Lang »Über die natürliche Ventilation und die Porosität von Baumaterialien« angestellt und im Jahre 1877 veröffentlicht. Eine spätere Abhandlung (Dissertation der Universität Berlin) aus dem Jahre 1897 von W. Gosebruch »Über die Durchlässigkeit der Baumaterialien« behandelt die Frage bereits mehr nach der lüftungstechnischen Seite; als Ergänzung erschien im Jahre 1915 (Gesundh.-Ing.) eine kurze Veröffentlichung aus dem Laboratorium für technische Physik der Technischen Hochschule München von H. Frhr. v. Thielmann »Über die Luftdurchlässigkeit von Baumaterialien«.

So wichtig und grundlegend die angeführten Arbeiten für den Beginn einer Klärung dieses Themas waren, so ist ihr Inhalt doch zum größten Teil überholt durch die inzwischen erzielten Fortschritte in der Kenntnis der einschlägigen Gesetzmäßigkeiten. Die nachstehend mitgeteilten Untersuchungen dienten zur Feststellung praktisch brauchbarer Zahlenwerte für die Berechnung der bei natürlicher Ventilation und Windanfall durch die Luftdurchlässigkeit bedingten Wärmeverluste von beheizten Räumen. Es war hiezu erforderlich, die Versuche bei den dabei vorkommenden geringen Druckdifferenzen durchzuführen, und zwar nicht nur an einzelnen Steinen und kleinen Probestücken, vielmehr auch an gebauten Wänden und größeren Flächen, so daß Fehler, verursacht durch zufällige Materialverschiedenheiten, nach Möglichkeit ausgeschieden wurden.

Die zunächst nur für Baustoffe angestellten Beobachtungen wurden auch auf Baukonstruktionsteile ausgedehnt, und Versuche über die Luftdurchlässigkeit verschiedener Arten von Fenstern und Türen angestellt, um gleichzeitig ein Urteil darüber zu gewinnen, inwieweit mit deren Beteiligung am Luftwechsel in einem Raum überhaupt von einem »Atmen der Wände« gesprochen werden kann. Schließlich wird noch gezeigt, wie der Luftaustausch durch Spalten und Undichtigkeiten rechnerisch ermittelt werden kann und diese Berechnung auch für einige bemerkenswerte Fälle durchgeführt.

Theoretische Grundlagen.

Beim Strömen von Luft durch einen porösen Körper sind die in ihm auftretenden Vorgänge im einzelnen meßtechnisch nicht zu erfassen. Wohl wissen wir, daß die auf beiden Seiten einer porösen Wand herrschende Druckdifferenz imstande ist, eine bestimmte Luftmenge hindurchzupressen und daß durch die dabei gebotenen Widerstände die Druckdifferenz aufgezehrt wird. Der Weg, den die einzelnen Luftteilchen beim Durchströmen einschlagen, und die Unterteilung des Druckgefälles im Baustoff wird jedoch verschieden sein je nach seiner Porosität, d. h. nach Zahl, Größe, Größenverschiedenheit, Form und Anordnung der einzelnen Poren. Da diese Eigenschaften der Poren mathematisch nicht zu definieren sind, wird es auch nicht möglich sein, die Luftdurchlässigkeit eines porösen Stoffes mit Hilfe von Durchfluß- und Ausflußgleichungen zu berechnen, sie muß vielmehr für jedes Material durch das Experiment festgestellt werden.

Die Strömungsvorgänge bei Flüssigkeiten und Gasen sind in zahlreichen Arbeiten[1]) behandelt worden.

Man hat hierbei bekanntlich zwei Gebiete zu unterscheiden, nämlich das der laminaren oder Poisseuille-Strömung und das der turbulenten Strömung. Sie scheiden sich voneinander bei der sog. Grenz- oder kritischen Geschwindigkeit, die durch die Reynoldssche Zahl $\mathrm{Re} = \frac{d \cdot w \cdot \varrho}{\mu}$ charakterisiert ist. In dieser Kenngröße bedeutet d den Rohrdurchmesser in m, w die Strömungsgeschwindigkeit in $\mathrm{m \cdot h^{-1}}$, ϱ die Massendichte in $\mathrm{kg \cdot h^2 \cdot m^{-4}}$ und μ die Zähigkeit in $\mathrm{kg \cdot h \cdot m^{-2}}$. Der untere Grenzwert dieser Zahl beträgt nach den neueren Feststellungen etwa $\mathrm{Re} = 2320$.

Während bei den in der Technik verwendeten Leitungsquerschnitten und Strömungsgeschwindigkeiten die kritische Geschwindigkeit fast immer überschritten und damit dort nur das Gebiet der turbulenten Strömung von praktischer Bedeutung ist, kommt beim Luftdurchgang durch feinporige Körper bei kleinen Druckdifferenzen in der Größenordnung von 0,01 bis 1 mm W.-S., wie sie bei der natürlichen Ventilation durch die Verschiedenheit der spezifischen Gewichte der Raumluft gegenüber der kälteren Außenluft gebildet werden, meist nur das Gebiet der laminaren Strömung in Frage. Bei grobporigem Material, wie auch bei Spalten und Ritzen, ist jedoch auch bereits bei diesen kleinen Druckdifferenzen vielfach die Grenzgeschwindigkeit schon überschritten, so daß dort die Strömung überwiegend turbulent ist.

Im Gebiet der laminaren Strömung ist die Geschwindigkeit proportional der Druckdifferenz, bei der turbulenten Strömung ist mit ziemlicher Annäherung das Quadrat der Geschwindigkeit proportional der Druckdifferenz. Es ist deshalb zweckmäßig, bei der später angewandten graphischen Darstellung dieser Abhängigkeit das logarithmische Koordinatensystem zu wählen, da hierbei die Luftgeschwindigkeiten bzw. Volumina, in Abhängigkeit von der Druckdifferenz aufgetragen, gerade Linien ergeben, die gegen die Horizontale unter 45° bzw. unter etwa 27° geneigt sind.

Wie bereits angegeben liegt es in der Struktur des porösen Körpers begründet, welchen Weg die Luft beim Durchgang wählt und an welchen Stellen die Druckdifferenz hauptsächlich aufgebraucht wird. Naturgemäß wird dies auf dem Wege zwischen zwei benachbarten festen Teilen hindurch

[1]) Im Text gekürzte Wiedergabe eines Abschnittes aus einer unter dem Titel »Beiträge zur Berechnung des Wärmebedarfes von Gebäuden« am 1. Juli 1924 bei der Technischen Hochschule München eingereichten und genehmigten Doktordissertation. Die Versuche wurden zum überwiegenden Teil im Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München angestellt, einige ergänzende neuere Beobachtungen aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München, wurden in die Abhandlung eingefügt und mitverarbeitet.

[1]) S. hierüber E. Becker, Strömungsvorgänge in ringförmigen Spalten und ihre Beziehungen zum Poisseuilleschen Gesetz«. Mitteilungen über Forschungsarbeiten a. d. Gebiete d. Ingenieurwesens, Heft 48, 1907. — H. Blasius, »Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten«. M. ü. F., Heft 131, 1913. — H. Ombeck, »Druckverlust strömender Luft in geraden zylindrischen Rohrleitungen«. M. ü. F., Heft 158 und 159, 1914. — L. Schiller, »Untersuchungen über laminare und turbulente Strömung«. M. ü. F., Heft 248, 1922. — M. Jakob u. S. Erk, »Der Druckabfall in glatten Rohren und die Durchflußziffer von Normaldüsen«. M. ü. F., Heft 267, 1924.

oder an der engsten Verbindungsstelle zwischen zwei benachbarten Poren der Fall sein.

Der poröse Körper hat nun aber eine Mischung von Durchflußquerschnitten verschiedener Größe. Es kann deshalb bei einer gegebenen Druckdifferenz entweder auf allen Durchflußwegen noch die laminare Strömung herrschen, oder in einem Teil derselben bereits die turbulente Strömung vorhanden sein, während im übrigen noch laminare Strömung herrscht, oder schließlich an allen Stellen die Strömung turbulent sein. Bei der graphischen Darstellung der durchfließenden Luftmengen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz muß sich dies darin zeigen, daß im Diagramm von einer bestimmten Druckdifferenz ab, bis zu der an allen Stellen laminare Strömung herrscht, die bis dahin unter 45° verlaufende Gerade in eine Kurve übergeht, welche dann von derjenigen Druckdifferenz ab, wo in allen Drosselstellen die turbulente Strömung vorhanden ist, wieder als Gerade, und zwar mit der Horizontalen unter 27° geneigt, verläuft.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Darstellung der Luftdurchlässigkeit von Fenstern und Türen. Auch hier beteiligen sich am Luftdurchgang die verschiedensten Spaltbreiten, es wird daher ebenfalls eine Mischung von laminarer und turbulenter Strömung auftreten. Gegenüber den Strömungsvorgängen in einem feinporigen Material wird jedoch hier der Einfluß der laminaren Strömung an der Gesamtdurchlässigkeit meist zurückgedrängt gegenüber der an den Stellen größerer Durchlässigkeit auftretenden turbulenten Strömung; in der graphischen Darstellung der Luftdurchlässigkeit wird deshalb die Neigung der Kurve überwiegend durch turbulente Strömung beeinflußt sein.

Bei der eingangs angeführten ältesten Arbeit von C. Lang waren als »Tatsachen« die Beziehungen aufgestellt worden, daß die Luftdurchlässigkeit eines Materials umgekehrt proportional der Dicke und direkt proportional der Druckdifferenz ist. W. Gosebruch hat sich bemüht, die lineare Abhängigkeit von der Dicke nachzuweisen, was ihm jedoch nur annähernd gelang, einerseits wegen der Unmöglichkeit, zwei in bezug auf Luftdurchlässigkeit vollständig gleiche Materialien in verschiedenen Dicken herzustellen, andererseits, weil wir nach dem Vorstehenden heute wissen, daß diese lineare Abhängigkeit bei den von ihm angewendeten Druckdifferenzen nur annähernd erfüllt sein konnte. Auch hat er die lineare Abhängigkeit der Luftmenge von der Druckdifferenz nur annähernd festgestellt, und zwar war die Abweichung um so größer, je durchlässiger das Material war, wie es auch wegen der mit den größeren Durchflußquerschnitten vorhandenen vermehrten turbulenten Strömung sich ergeben mußte. Schließlich hat v. Thielmann, um einen Vergleich seiner Versuchsergebnisse mit denen von Lang und Gosebruch vornehmen zu können, in Anlehnung an die Formeln für den Wärmedurchgang, nach der Gleichung $L = c \cdot \frac{\Delta p \cdot F}{\delta}$ eine Art »Durchlässigkeitszahl« c für jedes Material, bezogen auf eine bestimmte Fläche F, eine bestimmte Druckdifferenz Δp und eine bestimmte Dicke δ ausgewertet. Alle derartigen verschiedentlich vorgenommenen Umrechnungen von Dicken und Druckdifferenzen, wie sie beim Versuch vorhanden waren, auf andere Dicken und Druckdifferenzen, wie sie bei der jeweiligen Verwendung auftreten, sind nun nicht allgemein zulässig. Es ist dies nur dann berechtigt, wenn sowohl beim Versuch, nach dessen Ergebnis eine Luftdurchlaßzahl ausgewertet worden war, als auch bei der mit Hilfe dieser Zahl berechneten Luftdurchlässigkeit die laminare Strömung herrscht. Denn nur für dieses Gebiet besteht die lineare Abhängigkeit zwischen Dicke, Druckdifferenz und Luftgeschwindigkeit bzw. durchfließendem Luftvolumen, jedoch, wie aus den späteren graphischen Darstellungen zu ersehen ist, nicht mehr dann, wenn die Kurve für die Luftdurchlässigkeit von der unter 45° verlaufenden Geraden abweicht. Man wird somit für das Gebiet der laminaren Strömung, wie sie bei ganz feinporigen Stoffen bei niederen Druckdifferenzen und entsprechender Dicke vorhanden ist, den Begriff der Luftleitzahl beibehalten können, ihn jedoch derart einengen müssen, daß er nur bis zu einer gewissen, für jedes Material anzugebenden Größe der Verhältniszahl von $\frac{\Delta p}{\delta}$, die aus den Versuchswerten zu entnehmen ist, Gültigkeit hat. Die Verwertung dieser Überlegungen wird bei der später angegebenen Berechnung von Luftleitzahlen für einige Arten von Mauerputz gezeigt werden.

Bei allen eingangs erwähnten Veröffentlichungen über die Luftdurchlässigkeit poröser Stoffe wurde das experimentell gefundene Luftvolumen auf 0° C und 760 mm Barometerstand umgerechnet. Diese Reduktion ist sowohl für die Temperatur als auch für den Druck unberechtigt; denn mit einer Änderung der Lufttemperatur ändert sich auch der Porenquerschnitt des Materials, und zwar für jedes Material verschieden und in unkontrollierbarer Weise. Außerdem ändert sich auch mit der Temperatur die Zähigkeit der Luft, so daß das auf 0° reduzierte Volumen nicht dasjenige ist, das bei 0° hindurchströmen würde. Ebenso ist auch die Reduktion des Luftvolumens auf den normalen Barometerstand von 760 mm Quecksilber unberechtigt, da die Zähigkeit der Gase vom Druck unabhängig ist; es bleibt deshalb bei gegebener Druckdifferenz das durchströmende Volumen mit einer Änderung des Druckes dasselbe. Unter diesen Umständen erscheint es überflüssig, den Druck überhaupt zu erwähnen, es braucht nur die Temperatur angegeben zu werden.

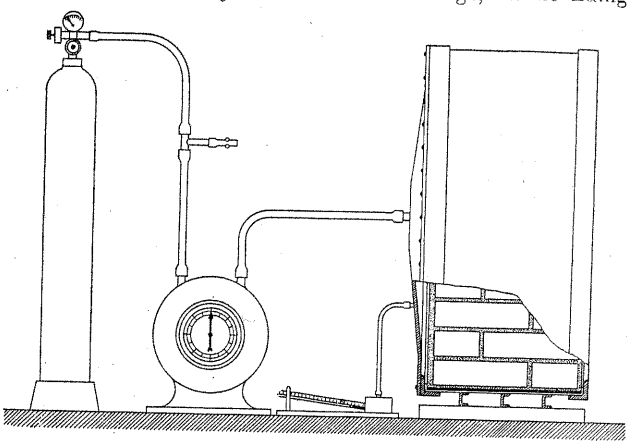

Abb. 1.

Anordnung und Durchführung der Versuche.

Die Versuchsanordnung ist aus vorstehender Abb. 1 zu ersehen. Die Luft wurde einer Druckluftflasche mit Reduzierventil entnommen, zur genauen Einregulierung und Konstanthaltung des Druckes wurde ein T-förmiges Zwischenstück eingeschaltet, durch welches nach geeigneter Abdrosselung mittels Quetschhahnes ständig ein Teil der Luft seitlich ausströmen konnte. Zur Erzeugung größerer Luftmengen diente ein Ventilator, der mit elektrischem Antriebsmotor direkt gekuppelt war; hierbei erfolgte das Einstellen und Konstanthalten des Druckes durch Regulieren der Tourenzahl des Motors mittels eines Vorschaltwiderstandes.

Zur Messung der Luftmengen wurden zwei Gasuhren verschiedener Größe verwendet; die kleinere war bis zu einer stündlichen Durchflußmenge von etwa 1,5 m³/h brauchbar, während mit der großen Uhr Mengen bis zu 22,5 m³/h gemessen werden konnten. Die Angaben ihrer Zählerwerke wurden durch Eichung nachkontrolliert. Für die kleinere Uhr erfolgte dies mit Hilfe der Junkersschen Eichvorrichtung, bei der großen Uhr wurden die Durchflußmengen mit denjenigen eines Kubizierapparates von Elster verglichen. Beide Uhren zeigten bis auf etwa 0,5% richtig, wobei allerdings Voraussetzung war, daß bei den Messungen die Trommel mindestens einmal völlig umlief.

Die Drücke wurden mittels alkoholgefüllter Mikromanometer nach Krell mit geneigtem Meßrohr bestimmt.

Es konnten hierbei als kleinste Druckdifferenzen noch solche bis zu 0,025 mm W.-S. genau gemessen werden.

Bei der Durchführung der Versuche wurde das für eine bestimmte eingestellte Druckdifferenz durch das zu untersuchende Material hindurchströmende Luftvolumen in Zeitabständen von 5 zu 5 min durch Ablesen an der Gasuhr festgestellt und die Beobachtungen je nach Übereinstimmung eine halbe bis eine Stunde fortgesetzt. Die Zeitmessungen erfolgten mittels einer Stoppuhr, ihr genauer Gang wurde durch Vergleich mit den Minutenspringern im Laboratorium, die von der Präzisionsuhr des Mathematischen Instituts der Technischen Hochschule betätigt wurden, festgestellt.

Alle Versuche wurden bei Raumtemperaturen zwischen 17 und 20° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 75% durchgeführt. Um mit den praktischen Verhältnissen in Übereinstimmung zu sein, wurde eine künstliche Trocknung der Luft absichtlich nicht vorgenommen.

Versuchsergebnisse.

1. Ziegelmauer.

In bezug auf die Luftdurchlässigkeit war es zunächst von Interesse, die Verhältnisse bei der 1½ Stein starken Ziegelmauer zu klären. Es wurde deshalb ein gleichzeitig für Versuche zur Feststellung der Austrocknungszeit aufgebauter Mauerblock von 1 m × 1 m Fläche, innen glatt verputzt, außen mit Spritzbewurf versehen, Gesamtstärke etwa 40 cm (1½ Stein) auf seine Luftdurchlässigkeit geprüft. Seine Stirnflächen waren durch Überstreichen mit Teer luftdicht abgeschlossen und auch die untere Auflagefläche durch den Einbau in eine Blechform, in die eine Teerschicht eingegossen war, abgedichtet worden (s. Abb. 1). Zur Durchführung der Versuche erhielt die Wand beiderseits einen quadratischen Ring aus Winkeleisen aufgezogen, der durch Ausgießen mit Teer luftdicht mit ihr verbunden wurde. Auf die Winkeleisen wurde an beiden Wandseiten eine Abschlußplatte aus Blech aufgeschraubt und durch Überstreichen mit Kitt aus einer Mischung von heißem Kolophonium und Wachs abgedichtet. In der einen Abdeckplatte war der Zuführungsstutzen für die Luft, außerdem ein Anschluß zur Druckmessung angebracht, das Abschließen der anderen Wandseite erfolgte, um erst durch einen Vorversuch zu prüfen, ob die Wand keine Stelle enthielt, an der Luft seitlich ausströmen konnte. Nachdem hierbei eine kleine Undichtigkeit entdeckt und die betreffende Stelle ausgebessert war, wurde der Deckel an der Ausflußseite wieder abgenommen und mit den Versuchen begonnen.

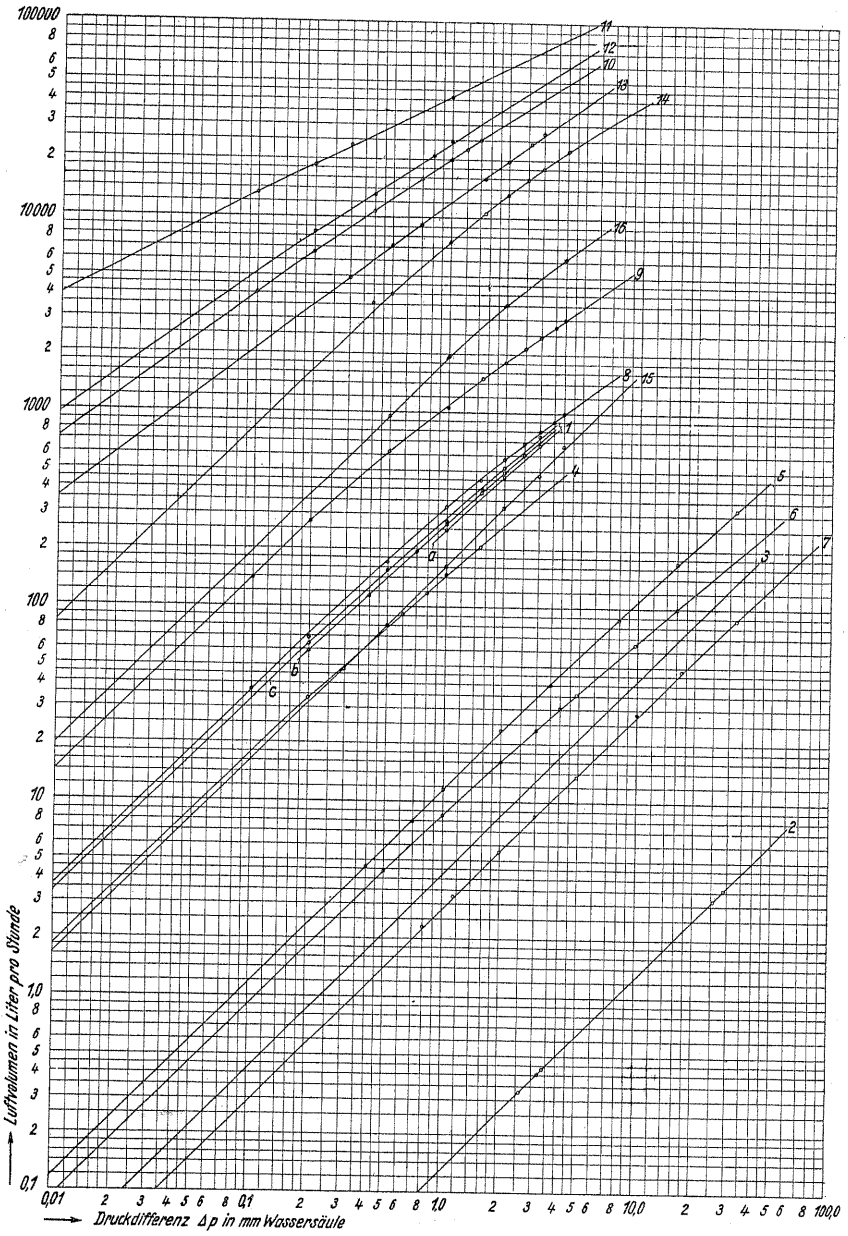

Diagramm I.

Die Beobachtungen wurden bei drei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden angestellt, das Ergebnis ist in einem logarithmischen Koordinatensystem im Diagramm I in den mit 1a, 1b und 1c bezeichneten Kurven graphisch aufgetragen. Dabei entsprechen die durch die Kurve 1a verbundenen Versuchspunkte einem Alter der Wand seit Aufbau von etwa 2 Monaten, die für Kurve 1b von etwa 3 Monaten und die für Kurve 1c bei völliger Austrocknung nach etwa 20 Monaten. Aus der gegenseitigen Lage der einzelnen Kurven ist eine geringe Zunahme der Luftdurchlässigkeit mit fortschreitender Austrocknung zu ersehen. Aus der Neigung der Kurven erkennt man, daß für den untersuchten Druckbereich nicht mehr die reine laminare Strömung vorhanden ist, vielmehr an einzelnen Durchflußstellen bereits Turbulenz herrscht.

Die beobachteten Ausfluß-Volumina sind um ein Vielfaches höher als sich aus den früheren, an einzelnen Ziegelsteinen durchgeführten Versuchen der Größenordnung nach hätte ergeben müssen. Es lag deshalb die Vermutung nahe, daß die Mörtelfugen gegenüber dem Stein sehr stark luftdurchlässig sind und sogar so, daß bei der gemauerten Wand der weitaus größte Teil des Widerstandes nicht durch das Mauerwerk, sondern durch den aufgebrachten Putz, und zwar namentlich durch die innere, glattgestrichene Putzschicht gebildet wird. Die Richtigkeit dieser Annahme wurde durch die folgenden Beobachtungen bestätigt.

2. Ziegelstein.

Zunächst wurde die Luftdurchlässigkeit eines einzelnen Ziegelsteines nochmals nachgeprüft. Seine Seitenflächen wurden mit Wachskitt abgedichtet und die Durchlässigkeit nach Einsetzen in einen rechteckigen Trichter für seine Fläche von 0,25 × 0,12 m² und Dicke von 6,5 cm festgestellt. Die Versuchswerte sind im Diagramm I in Kurve 2 (auf 1 m² Fläche bezogen in Kurve 3) eingetragen, ihre

Verbindungslinie zeigt im ganzen untersuchten Druckbereich die reine laminare Strömung. Berechnet man nach den gefundenen Werten die Luftdurchlässigkeit von 1 m² Wand, die nur aus 1½ Stein starken, also 25 + 12 = 37 cm Ziegelsteinmaterial ohne Mörtel und Putz besteht, so würde bei einem Druck von 1 mm W.-S. stündlich ein Luftvolumen von rd. 0,74 l/h hindurchströmen, also etwa der 380. Teil der an der Ziegelmauer einschließlich des Putzes bei diesem Druck tatsächlich festgestellten Luftmenge. Dieses Ergebnis bestätigt die außerordentlich große Durchlässigkeit der Mörtelbänder im Mauerwerk.

3. Putzschichten.

Es war nun zu prüfen, ob Ziegelmauerwerk ohne Verputz der Luftdurchlässigkeit überhaupt einen nennenswerten Widerstand bietet, bzw. welchen Anteil am Gesamtwiderstand der verputzten Wand die Putzschichten übernehmen. Zu diesem Zwecke war es nötig, eine Probe des auf der Ziegelmauer angebrachten Verputzes auf seine Durchlässigkeit gesondert zu untersuchen. Daran anschließend war es naheliegend, auch noch andere Arten von Putz auf ihre Luftdurchlässigkeit zu prüfen.

Die Proben wurden in einen quadratischen, auf ebener Unterlage liegenden Holzrahmen von etwa 0,85 m × 0,85 m Öffnung in einer Dicke von 2 bis 4 cm eingegossen (vgl. Abb 2.)

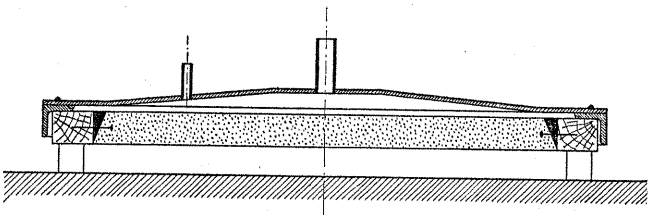

Abb. 2.

Zur sicheren Abdichtung der Randflächen wurden vor dem völligen Erhärten die Seiten der Platten mit dem Messer abgeschrägt und der dadurch entstandene keilförmige Raum mit heißem Teer ausgegossen. Dadurch war ein unbedingt dichter Abschluß der Randflächen erzielt. Nach Einsetzen des Rahmens in einen quadratischen Ring aus Winkeleisen und Abdichten desselben wurde nach erfolgter Austrocknung des Materiales die Deckplatte mit den Anschlüssen für Zuführung der Luft und Druckmessung aufgesetzt und abgedichtet.

a) Mauerputz. Die erste untersuchte Probe war der gewöhnliche Mauerputz, wie er auch am Mauerblock verwendet war, aus einer Mischung von 1 Teil Kalk und 5 Teilen Sand bestehend, der an der Oberfläche mit einem dünnen Schweißputz aus 2 Teilen Kalk und 1 Teil Schweißsand glatt gestrichen war. Die Gesamtdicke betrug 25 mm, die Fläche 0,85 × 0,85 m = 0,723 m². Das Ergebnis der Versuche ist im Diagramm I in Kurve 4 eingetragen, wobei die Luftvolumina auf 1 m² Fläche umgerechnet sind. Die Neigung der durch die Versuchspunkte gelegten Kurve ist ziemlich übereinstimmend mit der des verputzten Mauerblockes; sie zeigt, daß im untersuchten Druckbereich nicht mehr an allen Durchflußstellen die laminare Strömung vorhanden ist. Der Grund hierfür waren wohl die hier wie auch im Verputz der Ziegelmauer vorhandenen feinen Haarrisse. Die Werte der Luftdurchlässigkeit stimmen der Größenordnung nach sehr gut mit denen des verputzten Mauerblockes überein, zumal wenn man berücksichtigt, daß der äußere Spritzbewurf der Durchlässigkeit wohl keinen nennenswerten Widerstand bot und die innere Putzschicht, anstatt 2,5 cm wie hier, nur 1,5 cm dick war.

Es hat sich somit die Vermutung bestätigt, daß bei der Luftdurchlässigkeit von verputztem Mauerwerk der Widerstand der Mauer selbst vernachlässigbar klein ist gegenüber dem der aufgebrachten Putzschichten.

b) Mauerputz geweißt. Dieselbe Putzprobe wurde durch zweimaliges Überstreichen mit Kalk geweißt und nach Trocknen die Luftdurchlässigkeit erneut festgestellt. Die Ergebnisse der Beobachtungen sind im Diagramm I in Kurve 5 für 1 m² Fläche dargestellt. Wie zu erwarten war, wurde durch das Weißen die Luftdurchlässigkeit ganz beträchtlich, etwa auf den 10. Teil der vorherigen Werte, vermindert; im untersuchten Druckbereich bis etwa 4 mm Druckdifferenz herrscht die laminare Strömung, um dann bei Zunahme der Druckdifferenz langsam davon abzuweichen.

c) Rohrputz. Das untersuchte Material bestand aus 1 Teil Kalk, 5 Teilen Sand und ½ Teil Romanzement, darüber wieder ein dünner Schweißputz aus 2 Teilen Kalk und 1 Teil Schweißsand. Die Versuchsfläche betrug 0,85 m × 0,85 m, die Dicke 20 mm. Die Ergebnisse, auf 1 m² Fläche bezogen, sind im Diagramm I in Kurve 6 eingetragen. Bei den untersuchten Druckdifferenzen ist bereits eine Abweichung von der laminaren Strömung zu erkennen. Die Luftdurchlässigkeit selbst hat sich gegenüber der ungeweißten Putzplatte wesentlich erniedrigt, obwohl die letztere um ½ cm stärker war, außerdem hier noch ein Teil des Volumens in der Rohrung bestand. Der Zusatz von Zement hat somit die Luftdurchlässigkeit erheblich vermindert.

d) Rabitzputz. Die Probe war hergestellt aus 1 Teil Kalk, 5 Teilen Sand, 2 Teilen Romanzement, darauf wieder ein Schweißputz aus 2 Teilen Kalk und 1 Teil Sand. Die untersuchte Fläche betrug 0,87 m × 0,87 m, die Dicke im Mittel 40 mm. Die festgestellten Werte für die Luftdurchlässigkeit, auf 1 m² Fläche bezogen, sind im Diagramm I in Kurve 7 eingetragen. Der vermehrte Zementzusatz hat hier die Luftdurchlässigkeit noch weiter vermindert. Bis zu einer Druckdifferenz von etwa 20 mm herrscht die reine Laminarströmung, bei größeren Druckunterschieden ist langsam der Übergang nach der turbulenten Strömung zu erkennen.

Als Ergebnisse der bisherigen Versuche sind zusammenfassend folgende Schlüsse zu ziehen:

Die an einzelnen Ziegelsteinen festgestellte Luftdurchlässigkeit ist sehr gering und gibt ein völlig falsches Bild über die Durchlässigkeit der gemauerten Wand. Ihre Luftdurchlässigkeit im rohgemauerten, unverputzten Zustand ist durch den Einfluß der Mörtelfugen außerordentlich groß. So hat man bei der Berechnung der Durchlässigkeit einer verputzten Mauer, und zwar nicht nur für die Ziegelmauer, praktisch nur den Widerstand der aufgebrachten Putzschichten zu berücksichtigen. Die verschiedenen Putzsorten unter sich nehmen bei Zusatz von Zement in der Luftdurchlässigkeit bedeutend ab, denselben Einfluß übt auch das Weißen des Putzes aus.

Für alle untersuchten Putzarten ist für einen Teil des Druckbereiches die laminare Strömung vorhanden. Entsprechend den eingangs angegebenen Betrachtungen wird es daher möglich sein, bis zu einer für jedes Material giltigen maximalen Grenzzahl von $\frac{\Delta p}{\delta}$ eine Luftleitzahl auszuwerten. Zur Festlegung der Grenzzahlen wurde jeweils diejenige Druckdifferenz aus der Kurve abgegriffen, bei der die Abweichung von der laminaren Strömung einsetzt. Die nach der eingangs angegebenen Gleichung $L = c \cdot \frac{\Delta p \cdot F}{\delta}$ ausgewertete Luftleitzahl c in $\frac{\text{Liter}}{\text{m} \times \text{h} \times \text{mm W.-S.}}$ sei berechnet aus den bei 0,1 mm Druckdifferenz durch den untersuchten Stoff fließenden Luftmengen, da bei diesem Überdruck für alle Proben die Strömung noch laminar ist.

Mauerputz:

$$\text{Luftleitzahl } c = \frac{18 \cdot 0{,}025}{0{,}1} = 4{,}5 \ \frac{\text{Liter}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mm W.-S.}}$$

$$\text{Grenzzahl } \frac{\Delta p}{\delta} \text{ etwa } \frac{0{,}20}{0{,}025} = 8{,}0, \text{ mit Annäherung noch}$$

$$\text{bis } \frac{0{,}4}{0{,}025} = 16.$$

Rohrputz:

Luftleitzahl $c = \frac{0{,}9 \cdot 0{,}02}{0{,}1} = 0{,}18 \frac{\text{Liter}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mm W.-S.}}$

Grenzzahl etwa $\frac{2}{0{,}2} = 10$, mit Annäherung noch bis $\frac{4}{0{,}2} = 20$.

Rabitzputz:

Luftleitzahl $c = \frac{0{,}282 \cdot 0{,}04}{0{,}1} = 0{,}11 \frac{\text{Liter}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mm W.-S.}}$

Grenzzahl etwa $\frac{20}{0{,}4} = 50$, mit Annäherung noch bis $\frac{60}{0{,}4} = 150$.

Die Auswertung dieser Luftleitzahlen aus den vorstehenden Versuchen birgt nun insoferne eine kleine Ungenauigkeit in sich, als die untersuchten Proben nicht aus einheitlichem Material bestanden, vielmehr aus der eigentlichen Putzschicht und der aufgebrachten dünnen Lage Schweißputz zusammengesetzt waren. Mit einer Veränderung der Dicke des Putzes bleibt die Stärke des Schweißputzes jedoch annähernd dieselbe, so daß sein prozentualer Anteil am Gesamtwiderstand verschieden ist. Im Bereich der Änderungen, die für die Dicke im praktischen Gebrauch gegenüber den untersuchten Proben vorkommen, darf man die gefundenen Werte jedoch mit hinreichender Genauigkeit anwenden, um so mehr, als man sich immer bewußt sein muß, daß die Luftleitzahl durch kleine Fehler im Material sehr stark beeinflußt werden kann und einen weit weniger feststehenden Wert darstellt als z. B. die Wärmeleitzahl.

4. Holzwandkonstruktionen.

Die in Abb. 3 und 4 dargestellten Holzhohlwände wurden nach Abschluß der Versuche zur Bestimmung ihrer Wärmedurchlässigkeit auch auf ihre Luftdurchlässigkeit geprüft. Zu diesem Zwecke wurde das Versuchshaus, in das die beiden Wände eingesetzt waren, in seinen übrigen Teilen luftdicht abgeschlossen und die nötigen Stutzen für Luftzuführung und Druckmessung angebracht. Zuerst wurde die Durchlässigkeit beider Wände zusammen geprüft, nach Beendigung dieser Versuchsreihe die unverputzte Wand (Abb. 4) auf der Innenseite mit Papier überklebt und durch Überstreichen mit Teer luftdicht gemacht. Es wurde dann eine zweite Versuchsreihe angestellt, die die Durchlässigkeit der verputzten Wand (Abb. 3) ergab. Die Differenz zwischen den Werten der ersten und zweiten Beobachtungsreihe ergab schließlich die Durchlässigkeit der unverputzten Wand allein.

a) verputzte Holzhohlwand. Die Wand bestand, wie aus Abb. 3 ersichtlich, aus einem Holzrahmen, der beiderseits mit Dachpappe abgedeckt war. Auf der Außenseite war eine Holzschalung, auf der Innenseite eine ebensolche mit darüber liegendem Rohrputz angebracht. Der durch den Holzrahmen mit seiner beiderseitigen Dachpappeabdeckung gebildete Luftraum war durch eine eingespannte Asphalt-Wellpappe unterteilt.

Die Versuchsfläche der Wandplatte betrug 2 m × 2 m, die Versuchswerte auf 1 m² bezogen sind im Diagramm I in Kurve 8 dargestellt. Die Größe der Luftdurchlässigkeit stimmt in der Größenordnung gut mit dem für Mauerputz gefundenen Wert überein. Obwohl die Versuchswand einen Rohrputz (23 mm Stärke) hatte, ist ein Vergleich mit dem geprüften Rohrputz (Kurve 6) nicht zulässig, da letzterer mit einem Zementzusatz hergestellt, während hier nur Kalk verwendet worden war.

b) Unverputzte Holzhohlwand. Die Wand hatte wie aus Abb. 4 ersichtlich, im Innern den gleichen Aufbau, wie die vorher beschriebene. An Stelle der bei letzterer aufgebrachten Holzschalung mit Rohrputz war jedoch hier nur eine etwas stärkere Holzschalung vorhanden.

Die Versuchsfläche betrug ebenfalls 2 m × 2 m, die auf 1 m² bezogenen Werte der Luftdurchlässigkeit sind im Diagramm I in Kurve 9 eingetragen.

Die für die beiden Wandplatten festgestellten Werte ihrer Luftdurchlässigkeit sind nun nicht ohne weiteres auf die bei ihrer praktischen Verwendung vorhandenen Verhältnisse zu übertragen. Bei Holzwänden wird die Luftdurchlässigkeit in der Hauptsache durch die beim Aneinanderfügen der einzelnen Wandplatten entstehenden Undichtigkeiten verursacht sein; denn bei unsachgemäß ausgeführter Abdichtung dieser Stoßfugen können ganz beträchtliche Luftmengen durch sie ausströmen, denen gegenüber die Durchlässigkeit der einzelnen Wandplatten selbst ohne Bedeutung ist. So könnten die hier festgestellten Werte für den Luftdurchgang bei Holzwänden ein ganz unzutreffendes Bild liefern; auch hier wird jedoch, wie bei der gemauerten Steinwand, eine innen aufgebrachte, zusammenhängende Putzschicht einen guten Luftabschluß gewährleisten.

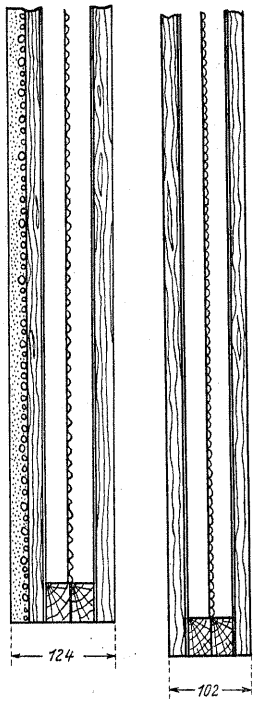

Abb. 3.

Abb. 4.

5. Fenster.

Die Luftdurchlässigkeit von Fenstern, wie auch diejenige von Türen, allgemein in Zahlenwerten anzugeben, wird beim Kritiker auf berechtigte Bedenken stoßen. Man weiß, daß

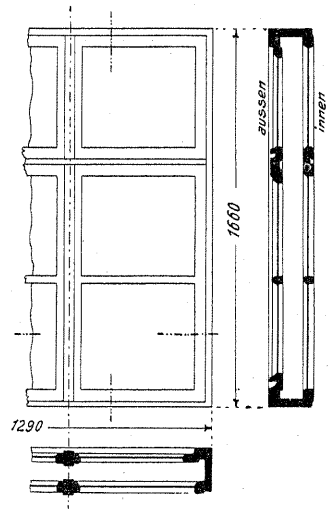

Abb. 5.

es gut schließende Fenster gibt, wie auch solche, in deren Nähe man im Winter im geheizten Raume wegen des Luftzuges sich kaum aufhalten kann. Desgleichen lehrt die Betrachtung von Türen, daß sie oft fingerbreite Spalten, namentlich beim Abschluss am Fußboden, aufweisen. Eine zahlenmäßige Angabe der Undichtigkeit von schlechtschließenden Fenstern und Türen wird demnach nur schwer zu machen sein, dagegen ist bei gutschließenden Fenstern und Türen eine gewisse untere Grenze der Abdichtung gegen Luftdurchlässigkeit durch die praktische Ausführungsmöglichkeit gegeben.

Die hier auf ihre Luftdurchlässigkeit geprüften Fenster a, b und c waren nacheinander in die Wand eines Versuchshauses zur anschließenden Feststellung ihrer Wärmedurchlässigkeit eingebaut worden. Das Innere des Versuchshauses, soweit es aus Mauerwerk bestand, wurde bis über den Putz am Fensterrahmen bzw. Fensterkasten durch Bestreichen mit Teer luftdicht abgeschlossen. Das Fenster d) und die unter 6) angegebene Türe waren für die Versuche mit einem luftdicht abschließenden Kasten aus abgedichtetem Sperrholz umgeben worden[1]). Die Versuche wurden sowohl mit Saug- als auch mit Druckluft angestellt, d. h. die Luft wurde in beiden Richtungen durch die Fenster ge-

[1]) Die Durchführung dieser letzteren Versuchsreihen erfolgte im Forschungsheim für Wärmeschutz durch Herrn Dipl.-Ing. K. Schropp.

drückt. Ein nennenswerter Unterschied konnte dabei nicht festgestellt werden.

a) Kasten-Doppelfenster. Das erste auf seine Luftdurchlässigkeit geprüfte Fenster war ein neues, nach den üblichen Begriffen gut schließendes Kasten-Doppelfenster gewöhnlicher Bauart, wie es in nebenstehender Abb. 5 dargestellt ist[1]). Das innere Putzmaß nach Einbau betrug 1,66 m × 1,21 m.

Die Ergebnisse der Versuche über die Luftdurchlässigkeit sind im Diagramm I in Kurve 10 eingetragen. Gegenüber den bisher untersuchten Wänden und Putzarten zeigt das Fenster eine recht beträchtliche Luftdurchlässigkeit, so daß man zunächst glauben möchte, das Fenster sei nicht, wie oben angegeben, als gutschließend anzusprechen. Aus einem später angeführten Vergleich mit berechneten Ausflußzahlen von Öffnungen bestimmter Querschnitte ersieht man jedoch, daß seine Durchlässigkeit verhältnismäßig noch gering ist. Die Neigung der Verbindungslinie der Versuchspunkte zeigt, daß hier in der Hauptsache bereits die turbulente Strömung vorhanden ist.

b) Einfachfenster. Bei dem vorstehend angegebenen Kasten-Doppelfenster wurden nun auch das Innen- und Außenfenster gesondert auf ihre Luftdurchlässigkeit untersucht; es sind die so gefundenen Werte mit denjenigen, wie sie für ein Einfachfenster gelten, vergleichbar.

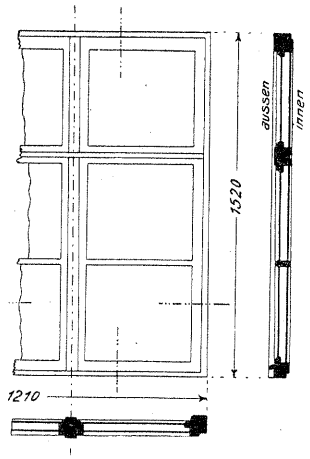

Abb. 6.

α) Innenfenster. Die für das Innenfenster bestimmte Durchlässigkeit ist im Diagramm I in Kurve 11 eingetragen; die Neigung der Kurve folgt dem Gesetz für die turbulente Strömung.

β) Außenfenster. Das untersuchte Außenfenster zeigt, wie in Diagramm I aus Kurve 12 ersichtlich, gegenüber dem Innenfenster nahezu nur die halbe Luftdurchlässigkeit; so übernimmt für das hier untersuchte Kasten-Doppelfenster das Außenfenster fast allein den Widerstand gegen die Luftdurchlässigkeit. Ein Vergleich der beiden Einfachfenster unter sich bestätigt die eingangs gemachte Bemerkung, daß die Durchlässigkeit von Fenstern sehr verschieden sein kann.

c) Stock-Doppelfenster. Die nächste untersuchte Fensterart war eine Spezialkonstruktion eines Stock-Doppelfensters mit doppelter Verglasung im einfachen Rahmen, wie es in nebenstehender Abb. 6 dargestellt ist. Bei der Konstruktion desselben war neben guter Lichtdurchlässigkeit besondere Sorgfalt auf guten Abschluß der Fensterfugen gelegt worden. Um dies zu erreichen waren letztere, mit Ausnahme der mittleren Längsfuge, durch geeignet angebrachte Filzstreifen abgedichtet worden. Das Fenster wurde in zwei Ausführungsarten geprüft, ihre Abmessungen waren die gleichen. Das innere Putzmaß nach Einbau betrug 1,51 m × 1,21 m. Das Ergebnis der Versuche ist im Diagramm I in Kurve 13 und 14 eingetragen. Die zweite Ausführungsart war wesentlich besser, ihre Luftdurchlässigkeit betrug nur etwa die Hälfte der ersten Ausführung. Aus einem Vergleich mit dem gewöhnlichen untersuchten Einfachfenster ist die Wirkung der Abdichtung zu ersehen, die Durchlässigkeit ist beträchtlich vermindert worden. Es tritt dies namentlich bei niederen Druckdifferenzen in die Erscheinung, so ist z. B. bei 0,1 mm W.-S. die Durchlässigkeit der besseren Ausführungsart des abgedichteten Stock-Doppelfensters nur 0,8 m³/h gegenüber 13 m³/h bei dem schlechtern der beiden Einfachfenster.

[1]) Vgl. E. Raisch, »Die Wärme- und Luftdurchlässigkeit von Fenstern verschiedener Konstruktion«. Gesundh.-Ing. 1922, Heft 9

d) Abgedichtetes Schiebefenster. Der Bau des geprüften Schiebefensters ist aus Abb. 7 zu ersehen, das Putzmaß betrug 1,56 m × 0,84 m, die Fensterfläche demnach 1,31 m². Der Rahmen des oberen und unteren Schiebefensterflügels hatte doppelte Verglasung mit einem Abstand der Glasscheiben von 28 mm. Bei der Konstruktion des Fensters war ebenfalls auf eine gute Abdichtung der Fugen geachtet und diese durch geeignet angebrachte Korkdichtungen und Keilnuten erreicht worden.

Das Ergebnis der Versuche ist im Diagramm I in Kurve 15 dargestellt, die Luftdurchlässigkeit ist bei dieser Ausführungsart noch ganz wesentlich niedriger als bei der vorher beschriebenen; über den ganzen untersuchten Druckbereich besteht die laminare Strömung, es ist also nirgends eine besonders undichte Stelle vorhanden.

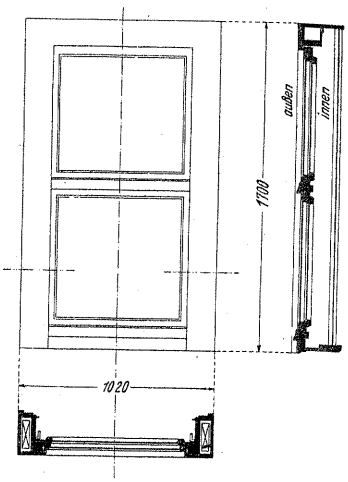

Abb. 7.

6. Türe.

Die auf Luftdurchlässigkeit untersuchte Türkonstruktion (Putzmaß 2,6 m × 1,31 m, Fläche 3,41 m²), die in gleicher Weise als Fenster ausgeführt wird, ist aus Abb. 8 zu ersehen. Die Tür- bzw. Fensterflügel sind unten und seitwärts mit schrägwandigen Keilfalzen versehen, welche in entsprechende Gegenfalze des Tür- bzw. Fensterstockes eingreifen. Beim Öffnen werden die Flügel durch den dazu dienenden Handgriff aus den Falzen gehoben, in geschlossenem Zustande bewirkt ihr Eigengewicht die selbsttätige Abdichtung in den Keilfalzen. Die Versuchsergebnisse sind in Diagramm I, Kurve 16 eingetragen, die Luftdurchlässigkeit ist größer als bei der vorher genannten Ausführungsart und beträgt etwa das 10fache davon; die Abweichung von der laminaren Strömung ist bei den größeren Druckdifferenzen deutlich zu erkennen. —

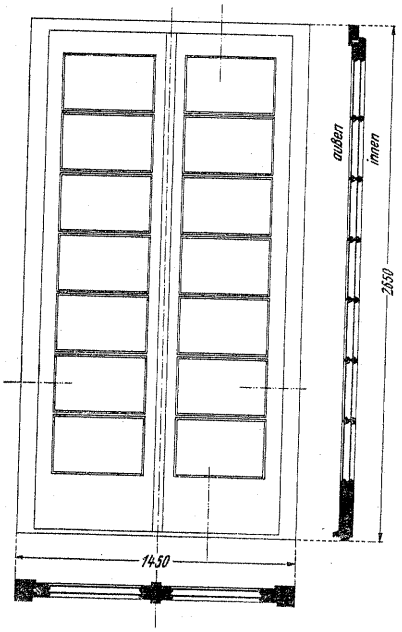

Abb. 8.

Die aus den Versuchen mit den verschiedenen Arten von Fenstern und der Türe gewonnenen Ergebnisse mögen wenigstens der Größenordnung nach einen allgemein gültigen Anhaltspunkt über die der jeweiligen Ausführungsart

entsprechende Luftdurchlässigkeit dieser Baukonstruktionsteile geben. Es wäre naheliegend gewesen, aus den experimentell bestimmten Werten die auf 1 m² Fugenlänge reduzierte Durchlässigkeit zu berechnen, um, namentlich bei Fenstern, dann auch verschiedene Fenstergrößen berücksichtigen zu können. Dies würde jedoch zu unrichtigen Extrapolationen gegenüber der untersuchten Größe führen; denn die auffallend undichten Stellen der einzelnen Fenster waren in der Hauptsache die Ecken, d. h. der rechtwinklige Stoß zweier Fugen, wie durch Abtasten während des Versuches mit Hilfe einer brennenden Kerze festgestellt werden konnte. Die Zahl der Ecken vermehrt oder vermindert sich nun nicht auch gleichzeitig mit einer Vergrößerung oder Verkleinerung des Fensters, die am meisten durchlässigen Stellen bleiben dieselben. Eine Veränderung der Fugenlänge übt somit einen untergeordneten Einfluß auf das gesamte durchfließende Luftvolumen aus.

Ein Vergleich der Durchlässigkeit der Fenster und Türe mit derjenigen der untersuchten Baustoffe und Wände zeigt, welche Teile der Umfassung eines Raumes für den Luftwechsel von Einfluß sind und an welchen Stellen demnach hauptsächlich die durch die Luftdurchlässigkeit bedingten Wärmeverluste entstehen. Die im folgenden Abschnitt durchgeführten Berechnungen der Luftdurchlässigkeit von undichten Stellen an Türen und Ähnlichem sollen die vorstehenden Beobachtungen bestätigen und erweitern.

Theoretische Betrachtungen und Gleichungen zur Berechnung der Luftdurchlässigkeit.

Bei all den vorstehend aufgeführten Baustoffen, Wänden und Baukonstruktionsteilen war die Luftdurchlässigkeit experimentell festgestellt worden. Dabei war keine Möglichkeit gegeben, gleichzeitig auch die Abmessungen der einzelnen Durchflußstellen zu bestimmen und in Zahlenwerten auszudrücken, um sich dadurch eine Vorstellung über ihre Größe machen zu können. Um dies zu ermöglichen und um gleichzeitig die Luftdurchlässigkeit von Ausflußöffnungen bestimmter Größe auch rechnerisch ermitteln zu können, wurden die folgenden Überlegungen und Versuche angestellt.

Die im Bauwesen vorkommenden Durchflußkanäle, durch die sich der Luftwechsel in Räumen vollzieht, besitzen selten eine bestimmte Form, lassen sich aber doch meist näherungsweise mit dem Rohr oder rechteckigen Schlitz vergleichen. Die hierfür unter bestimmten Voraussetzungen giltigen Durchflußgesetze und Gleichungen sind sowohl für die laminare als auch für die turbulente Strömung bekannt. Als Voraussetzung für ihre Anwendung zeigen sie die Bedingung, daß der eingesetzte Druckabfall in einem abgegrenzten mittleren Teilstück des Strömungsweges erfolgt, um Störungen durch Wirbelbildung beim Ein- und Auslauf und die Einflüsse durch Kontraktion auszuschalten, es muß ferner der Strömungsquerschnitt über die ganze Länge des Durchflußweges genau der gleiche sein. Alle diese Bedingungen sind in den hier zu betrachtenden Fällen nicht erfüllt; man ist vielmehr eher berechtigt, bei den meist kurzen Durchflußwegen die Annahme zu machen, daß an einer Stelle derselben ein engster Querschnitt vorhanden ist, so daß man den Vorgang mit großer Annäherung mit dem Durchfluß durch eine Öffnung in dünner Platte bzw. mit dem Ausfluß aus dieser Öffnung vergleichen kann. Es soll deshalb versucht werden, dem Vorgang nicht mit Durchflußgleichungen, vielmehr mit den Ausflußgesetzen näherzukommen.

Die Ausflußgleichung für Flüssigkeiten, die auch für Gase bei geringen Druckdifferenzen, wie sie bei den hier vorliegenden Betrachtungen in Frage kommen, anwendbar ist, lautet:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{\gamma}}$$

Darin bedeutet w = die Strömungsgeschwindigkeit in m/s, g = 9,81 m/s² die Schwerebeschleunigung, Δp = die Druckdifferenz zu beiden Seiten der Ausflußöffnung in kg/m² oder in mm W.-S. und γ = das spezifische Gewicht des ausströmenden Mediums in kg/m³.

Bei der Ableitung dieser Gleichung sind nur die gegenseitigen Beziehungen zwischen Druckhöhe und Geschwindigkeit betrachtet, die übrigen Vorgänge im Ausflußquerschnitt jedoch nicht berücksichtigt. Tatsächlich hat man es aber auch bei der hier beabsichtigten Anwendung der Gleichung mit dem Durchfluß eines elastischen Mediums auf einer endlichen Weglänge zu tun, so daß notwendigerweise wieder die Wirkung der inneren Reibung berücksichtigt werden muß, wenn der wirkliche Ausfluß richtig dargestellt werden soll. Es erfolgt dies durch Einführen eines Faktors, der diese verzögernde Einwirkung auf die Ausflußgeschwindigkeit darstellt. Bei der Berechnung des ausfließenden Volumens muß ein weiterer Faktor eingesetzt werden, der die durch etwaige Kontraktion bedingte scheinbare Verkleinerung des Querschnittes berücksichtigt. Beide Faktoren sollen in der Zahl α zusammengefaßt werden; die Gleichung für das durch einen Querschnitt von F m² stündlich ausfließende Luftvolumen V in m³ erhält dann die Form

$$V = \alpha \cdot F \cdot 3600 \sqrt{\frac{2 g \cdot \Delta p}{\gamma}};$$

die Größe von α muß für die Anwendung der Gleichung bekannt sein und wurde durch die nachstehend mitgeteilten Versuche bestimmt.

In der für die Ausflußgeschwindigkeit angegebenen Gleichung ist, ähnlich wie bei den Gleichungen für turbulenten Durchfluß, das Quadrat der Geschwindigkeit proportional der Druckdifferenz, die Neigung der Ausflußkurven in dem gewählten logarithmischen Koordinatensystem wird daher auch denjenigen für turbulenten Durchfluß ähnlich sein. Da jedoch, wie bereits angegeben, der durch die Ausflußgleichung wiederzugebende Durchfluß auf einer wohl sehr kleinen, aber praktisch nie unendlich kleinen Weglänge vor sich geht, so muß es auch hierfür ein Gebiet der laminaren Strömung geben, bei dem die Ausflußgleichung ungültig wird, d. h. nicht mehr angewandt werden darf. Aus den bereits erwähnten Versuchen von L. Schiller ist zu entnehmen, daß die sonst gültige Reynoldssche kritische Zahl durch Wirbelbildung, hervorgerufen durch die Ein- und Auslaufstörungen, die keine Zeit zur Beruhigung finden, sehr stark heruntergedrückt werden kann. Daß dies beim Ausfluß durch eine Öffnung in dünner Platte sehr wahrscheinlich ist, muß von vorneherein angenommen werden. Betrachtet man aber andererseits die Versuche mit den feinporigen Materialien, bei denen schließlich der Durch- oder Ausfluß ganz ähnlich wie hier, jedoch mit Hintereinanderschaltung vieler solcher Drosselstellen vor sich geht, so sieht man, daß bei hinreichend kleinen Querschnitten und Druckdifferenzen bzw. Geschwindigkeiten die laminare Strömung tatsächlich eintritt und die vorstehende Ausflußgleichung nicht kritiklos für alle Fälle anwendbar ist. Wie weit dies möglich ist, sollen die folgenden Versuche ebenfalls zeigen.

Durchführung der Versuche und Ergebnis derselben.

An fünf verschieden großen Bohrungen von 0,8, 1,02, 1,30, 2,02 und 3,04 mm Dmr. in 0,35 mm starken Messingplättchen wurden die durchfließenden Luftvolumina bestimmt, und zwar für den scharfkantigen Ein- und Ausflußquerschnitt, wie auch für die beiderseits abgerundeten Öffnungen. Wegen der dabei zu messenden geringen Luftmengen konnte die bisher angewandte Versuchsanordnung unter Verwendung einer Gasuhr nicht mehr beibehalten werden. Es wurde vielmehr derart verfahren, daß aus einem mit Wasser gefüllten Glasgefäß durch eine am Boden angebrachte Ausflußöffnung das Wasser langsam abgelassen und durch einen oben befindlichen Anschluß das gleiche Volumen an Luft durch die zu prüfende Ausflußöffnung hindurchgesaugt wurde. Aus dem Gewicht des in bestimmten Zeitabständen gemessenen ausfließenden Wassers wurde dann das durch die Bohrung fließende Luftvolumen bestimmt.

Die Versuchsergebnisse sind in Diagramm II für die verschiedenen Bohrungen der Ausflußöffnung eingetragen, und zwar die mit *a* bezeichneten Kurven für die scharfkantige, die mit *b* bezeichneten für die abgerundete Öffnung.

Die Wirkung der Abrundung ist aus der Vergrößerung der ausfließenden Volumina zu ersehen, die Neigung der Kurven ist für alle Querschnitte und Druckdifferenzen annähernd dieselbe und entspricht etwa der turbulenten Strömung. Die kleinste Reynoldssche Zahl, die durch einen Versuchspunkt noch belegt ist, beträgt Re = 18, liegt also weit unter dem für ihre niederste Grenze festgestellten Wert von 2320. Wie bereits vermutet, sind die Störungen beim Ein- und Auslauf trotz der Abrundung der Öffnungen noch so stark, daß bei den Kurven eine Richtungsänderung zur laminaren Strömung nicht zu erkennen ist. Man wird

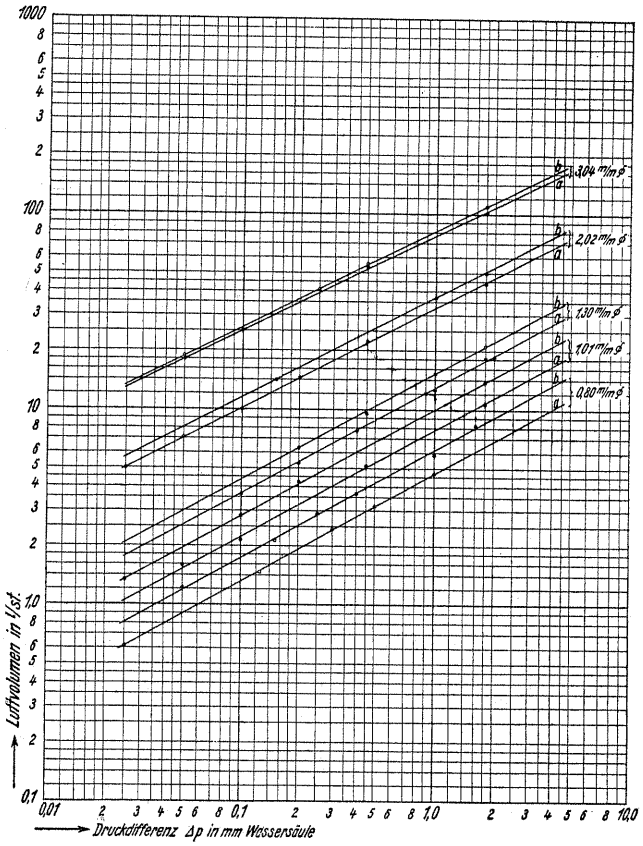

Diagramm II.

also für die Berechnung der durch Spalten und ähnliche Undichtigkeiten austretenden Luftmengen mit hinreichender Genauigkeit stets die Ausflußgleichung anwenden können. Die aus den Versuchen bei 1 mm Druckdifferenz ausgerechneten Zahlenwerte des Ausflußfaktors α sind aus folgender Zahlentafel zu entnehmen:

Bohrung *d* in mm	scharfkantig α	abgerundet α
0,8	0,645	0,850
1,02	0,658	0,844
1,30	0,660	0,800
2,02	0,698	0,796
3,04	0,726	0,779

Es ist nun schwer, aus den Versuchen den für die Berechnung der ausfließenden Luftmenge jeweils entsprechenden Wert von α auszuwählen, da die Begriffe »scharfkantig« und »abgerundet« nicht eindeutig sind, vielmehr namentlich die letztere Ausführung stark oder weniger stark konisch sein kann und dadurch in ihrer Wirkung auch verschieden zu beurteilen ist. Andererseits ist es aber auch nicht möglich, für die hier in Frage kommenden Öffnungen, z. B. bei einem Fenster- oder Türspalt, anzugeben, wie er in dieser Hinsicht beschaffen ist, wie man wohl überhaupt für gewöhnlich nicht einmal in der Lage ist, seine Abmessungen einigermaßen genau festzustellen, da man den ganzen Durchflußweg auf seine engste Stelle nicht verfolgen kann. Man wird somit für den vorliegenden Zweck, mit Rücksicht auf die überhaupt erreichbare Genauigkeit auch einen Mittelwert für α annehmen können, und ihn zu $\alpha = 0{,}75$ in die Gleichung einsetzen können. Der für den kreisförmigen Querschnitt festgestellte Wert von α wird dabei auch auf anders geformte Ausflußöffnungen mit genügender Genauigkeit übertragbar sein.

Berechnung der Luftdurchlässigkeit verschiedener Öffnungen.

Mit Hilfe der Ausflußgleichung soll nun die Luftdurchlässigkeit für einige in den Umfassungswänden von Räumen vorkommende Durchflußöffnungen berechnet werden, um einen Vergleich mit den an Wänden und Fenstern experimentell bestimmten Werten zu ermöglichen.

1. Schlüsselloch. Die Bohrung für den Schaft betrage 7 mm, die Fläche des Schlüsselbartes sei ebenso groß wie die des Schaftes angenommen. Man muß hier berücksichtigen, daß durch die beiderseitigen Abschlußplatten des Schloßgehäuses die Luft den Widerstand zweimal überwinden muß und das Druckgefälle sich deshalb hälftig unterteilt. Unter diesen Umständen errechnet sich eine Durchlässigkeit bei 1 mm Druckdifferenz von

$$V = \alpha \cdot F \cdot 3600 \sqrt{\frac{2\,g \cdot \Delta p}{\gamma}}$$

$$= 0{,}75 \cdot 2 \cdot 0{,}0035^2 \cdot \pi \cdot 3600 \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}5}{1{,}2}}$$

$$= 0{,}594 \text{ m}^3/\text{h},$$

also 50 mal soviel, als für 1 m² verputzte und geweißte Wand.

2. Schlitz am Rolladenkasten für durchlaufendes Zugband. Die freie Querschnittsfläche betrage 25 mm × 10 mm. Es errechnet sich hierfür bei 1 mm Druckdifferenz eine Luftdurchlässigkeit von 2,72 m³/h, also etwa 230 mal soviel als für 1 m² verputzte und geweißte Wand.

3. Türspalt. Bei einer Tür von 1 m Breite soll an der unteren Abschlußkante ein Spalt von 5 mm Weite vorhanden sein. Es errechnet sich hierfür bei 1 mm Druckdifferenz eine Durchlässigkeit von 54,4 m³/h, also rd. 4700 mal soviel als für 1 m² verputzte und geweißte Wand. Dabei sind Undichtheiten längs der übrigen Fugen, die zusammen etwa dieselbe Durchlässigkeit haben dürften, noch nicht berücksichtigt.

4. Das auf seine Luftdurchlässigkeit untersuchte neue Kasten-Doppelfenster war seiner Ausführung entsprechend als »gutschließend« bezeichnet worden. Nach Feststellung der durch das Innen- und namentlich durch das Außenfenster fließenden großen Luftmenge konnte dies mit Recht bezweifelt werden. Mit Hilfe der Ausflußgleichung soll nun untersucht werden, welche Undichtigkeit in den Fugen vorhanden sein muß, damit die bei 1 mm Druckdifferenz bestimmte Luftmenge von 41 bzw. 24 m³/h hindurchfließt. Die gesamte Fugenlänge des Fensters wurde zu 9,04 m festgestellt. Es errechnet sich dafür eine Undichtigkeit in allen Fugen für das schlechtere Außenfenster zu 0,42 mm, für das Innenfenster zu 0,25 mm[1]). Bei der Berechnung konnte die früher erwähnte Feststellung, daß die hauptsächlich durchlässigen Stellen durch den recht-

[1]) Vgl. hierüber auch F. Zaruba: »Der Windanfall«, Gesundh.-Ing. 1922, S. 107 ff. Es ist dort angegeben für Holzfenster mittelguter Ausführung etwa 2 mm Spaltbreite, bei vorzüglicher Ausführung und Instandhaltung bis zu 1 mm herunter. Wenn auch nach dem obenstehenden diese Spaltbreiten für den Durchschnitt doch etwas zu reichlich angenommen sein mögen, so dürfen immerhin die hier untersuchten Fenster sicher als »gutschließend« bezeichnet werden.

winkligen Stoß zweier Fugen gebildet war, nicht berücksichtigt werden. Derartige Stellen sind nun im vorliegenden Falle 12 vorhanden, so daß die Undichtigkeit längs den Fugen noch entsprechend zu verringern wäre. Die tatsächliche Ausführungsmöglichkeit von Fenstern wird aber kaum besser sein als die hier angeführte, so daß die Bezeichnung »gutschließend« ihre Berechtigung hat. Wohl bei der überwiegenden Mehrzahl der Fenster wird man mit weit durchlässigeren Ausführungen zu rechnen haben.

Zusammenfassung.

Für eine Anzahl von Baustoffen, Wänden und Baukonstruktionsteilen wurde die Luftdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Druckdifferenz experimentell bestimmt und aus den Ergebnissen für einige Stoffe Luftleitzahlen ausgewertet. Um die Luftdurchlässigkeit verschiedener Öffnungen auch rechnerisch ermitteln zu können, wurde die Ausflußgleichung verwendet und ihr Geltungsbereich durch Versuche nachgeprüft. Für einige bemerkenswerte, an Türen und Fenstern vorhandene undichte Stellen wurde der Luftdurchgang berechnet und mit den übrigen experimentell festgestellten Werten verglichen.

Eine Betrachtung der mitgeteilten Versuchsergebnisse zeigt, daß die Forderung des Hygienikers nach »atmenden Wänden« zum Zwecke der Lufterneuerung in Räumen keine berechtigte innere Begründung hat. Denn im Vergleich zu den übrigen Undichtigkeiten, wie sie an Fenstern und Türen unvermeidlich auftreten, kommt der Luftaustausch durch die übliche verputzte Wand nicht in Frage. Andererseits ist es jedoch für den Heizungstechniker zur Feststellung des Wärmebedarfes eines Raumes von Wichtigkeit, die Wärmeverluste, wie sie durch den Austritt warmer Raumluft und Eintritt kalter Außenluft hauptsächlich durch Fenster und Türen entstehen, zu kennen, da sie hierfür, namentlich bei Windanfall, eine beträchtliche und nicht mehr zu vernachlässigende Größe annehmen.[1])

Badewasserreinigung.

Von Stadtamtsrat **W. Olszewski,** approb. Nahrungsmittelchemiker, Dresden.

Um die Veränderungen kennenzulernen, die das Wasser in einem stark besuchten Hallenschwimmbad durch den Badebetrieb erleidet, wurde während der Dauer von 14 Tagen das Herren- (500 m³ Inhalt) und Damenschwimmbecken (275 m³ Inhalt) eines Hallenbades weder gefiltert noch gechlort. Frischfüllungen erfolgten jeden Samstag abend und jeden Mittwoch abend. Das zur Füllung verwendete Wasser war ein hartes Brunnenwasser von 33° Gesamthärte und 13° Karbonathärte. Der größte Badebetrieb war bei beiden Versuchen von Donnerstag bis Samstag. Die Veränderungen des Badewassers waren daher besonders in der Zeit von Donnerstag bis Samstag zu bemerken. Die Veränderungen gegenüber dem Frischwasser sind in folgenden Zahlentafeln zu erkennen:

I. Bakteriologische Untersuchung.

Tag der Entnahme	Herrenbad			Damenbad		
	Keime auf Gelatine in 1 cm³ Wasser	Kolizahl je cm³ Wasser	Kolititer in cm³	Keime auf Gelatine in 1 cm³ Wasser	Kolizahl je cm³ Wasser	Kolititer in cm³
Freitag früh (Frischfüllung)	50	0	über 25	76	0	über 25
Freitag mittag .	16 240	0,4	10	4 500	3,8	0,1
Samstag mittag	50	0	10	40	1	1
Samstag abend.	2 140	0	10	1 680	10	0,1
Donnerstag früh (Frischfüllung)	43	0	über 25	47	0	über 25
Freitag mittag .	12 550	5,6	1	3 050	2,4	1
Samstag abend.	1 960	2,4	1	1 160	17,8	0,01

[1]) Siehe hiezu S. 486 Anm. [2]).

II. Chemische Untersuchung.

	Frisch-füllung	Samstag-Abend		Samstag-Abend	
		Herren-bad	Damen-bad	Herren-bad	Damen-bad
Temperatur °C.	22,5	22,8	23,3	23,5	24,8
Ammoniak . .	0	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,45 mg/l	0,9 mg/l
Nitrite	0	0	0,1	Spuren	0,17
Nitrate	56,5 mg/l	60,0 mg/l	60,0 mg/l	60,0 mg/l	60,0 mg/l
Kaliumpermanganatverbrauch	2,9 »	6,0 »	6,3 »	9,0 »	9,2 »
Chlorzahl nach Froboese . . .	1,2 »	13,6 »	14,4 »	16,8 »	17,5 »
Durchsichtigkeit gegen Schriftprobe	über 1 m	55 cm	50 cm	60 cm	58 cm
Rückstand aus dem Filter . .	0	—	—	3,6 mg/l	3,1 mg/l

III. Biologische Untersuchung.

	Frisch-füllung	Samstag-Abend		Samstag-Abend	
		Herren-bad	Damen-bad	Herren-bad	Damen-bad
Rückstand aus 50 l Wasser im Planktonsieb	0	0,5 cm³	0,6 cm³	1,6 cm³	2,0 cm³

Beim Ablassen der Bäder wurde am Grund der Becken außer Schlammablagerung Algenwachstum bemerkt.

Die bakteriologische Untersuchung der gebrauchten Bäder ergab ein plötzliches Anschwellen der Keimzahl, die dann wieder abfiel, um im Laufe des dritten Tages durch den neuen Badebesuch wieder anzusteigen. Dieselbe Beobachtung ist auch schon bei bakteriologischen Untersuchungen von Schwimmbeckenwasser in anderen Großstädten gemacht worden. Es wird dies auf eine Sedimentation von Schwebestoffen über Nacht zurückgeführt, die Bakterien mitreißen. Durch biologische Vorgänge werden sie dann vernichtet. Die Gesamtkeimzahl im Herrenbad war während des Versuches höher als im Damenbad, dagegen waren im Damenbad durchschnittlich mehr Kolibakterien festzustellen.

Die chemische Untersuchung ergab in den Bädern vor dem Ablassen des Badewassers das Vorhandensein von Ammoniumverbindungen und Nitriten. Im Damenbad wurden etwas höhere Zahlen gefunden.

Der Rückstand auf dem Filter, der sich bis auf 3,6 mg/l erhöhte, gibt ebenso wie die Bestimmung des Siebrückstandes sowie der Durchsichtigkeit einen Anhalt für die Verschmutzung der Bäder durch Schwebestoffe usw. Während sich der Bakteriengehalt durch Sedimentation am zweiten Tage bessert, kann dies von der Durchsichtigkeit nicht behauptet werden. Bei dem Aufwühlen des Wassers infolge des Badens werden nur besonders schwere Schwebeteilchen und die beginnende Algenvegetation am Boden bleiben.

Bei einem Hallenschwimmbecken von 180 m³ Wasser mit täglicher Besucherzahl von durchschnittlich etwas über 200 Personen konnten Filter- und Chlorungsanlagen erst nach dem Umbau eingebaut werden. Es mußte zunächst eine behelfsmäßige Desinfektion des Schwimmbeckenwassers vorgenommen werden, da aus wirtschaftlichen Gründen eine häufigere als zweimal wöchentliche Füllung des Beckens nicht angängig war. Die Füllungen erfolgten jeden Montag und Donnerstag.

Als Desinfektionsmittel wurden organische Chloramine, und zwar Miamin sowie Caporit (Perchloron) angewandt. Die Substanzen wurden in Glasballons im Wasser gelöst und langsam durch einen Gummischlauch dem Wasser im Schwimmbecken zugegeben.

oder an der engsten Verbindungsstelle zwischen zwei benachbarten Poren der Fall sein.

Der poröse Körper hat nun aber eine Mischung von Durchflußquerschnitten verschiedener Größe. Es kann deshalb bei einer gegebenen Druckdifferenz entweder auf allen Durchflußwegen noch die laminare Strömung herrschen, oder in einem Teil derselben bereits die turbulente Strömung vorhanden sein, während im übrigen noch laminare Strömung herrscht, oder schließlich an allen Stellen die Strömung turbulent sein. Bei der graphischen Darstellung der durchfließenden Luftmengen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz muß sich dies darin zeigen, daß im Diagramm von einer bestimmten Druckdifferenz ab, bis zu der an allen Stellen laminare Strömung herrscht, die bis dahin unter 45° verlaufende Gerade in eine Kurve übergeht, welche dann von derjenigen Druckdifferenz ab, wo in allen Drosselstellen die turbulente Strömung vorhanden ist, wieder als Gerade, und zwar mit der Horizontalen unter 27° geneigt, verläuft.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Darstellung der Luftdurchlässigkeit von Fenstern und Türen. Auch hier beteiligen sich am Luftdurchgang die verschiedensten Spaltbreiten, es wird daher ebenfalls eine Mischung von laminarer und turbulenter Strömung auftreten. Gegenüber den Strömungsvorgängen in einem feinporigen Material wird jedoch hier der Einfluß der laminaren Strömung an der Gesamtdurchlässigkeit meist zurückgedrängt gegenüber der an den Stellen größerer Durchlässigkeit auftretenden turbulenten Strömung; in der graphischen Darstellung der Luftdurchlässigkeit wird deshalb die Neigung der Kurve überwiegend durch turbulente Strömung beeinflußt sein.

Bei der eingangs angeführten ältesten Arbeit von C. Lang waren als »Tatsachen« die Beziehungen aufgestellt worden, daß die Luftdurchlässigkeit eines Materials umgekehrt proportional der Dicke und direkt proportional der Druckdifferenz ist. W. Gosebruch hat sich bemüht, die lineare Abhängigkeit von der Dicke nachzuweisen, was ihm jedoch nur annähernd gelang, einerseits wegen der Unmöglichkeit, zwei in bezug auf Luftdurchlässigkeit vollständig gleiche Materialien in verschiedenen Dicken herzustellen, andererseits, weil wir nach dem Vorstehenden heute wissen, daß diese lineare Abhängigkeit bei den von ihm angewendeten Druckdifferenzen nur annähernd erfüllt sein konnte. Auch hat er die lineare Abhängigkeit der Luftmenge von der Druckdifferenz nur annähernd festgestellt, und zwar war die Abweichung um so größer, je durchlässiger das Material war, wie es auch wegen der mit den größeren Durchflußquerschnitten vorhandenen vermehrten turbulenten Strömung sich ergeben mußte. Schließlich hat v. Thielmann, um einen Vergleich seiner Versuchsergebnisse mit denen von Lang und Gosebruch vornehmen zu können, in Anlehnung an die Formeln für den Wärmedurchgang, nach der Gleichung $L = c \cdot \frac{\Delta p \cdot F}{\delta}$ eine Art »Durchlässigkeitszahl« c für jedes Material, bezogen auf eine bestimmte Fläche F, eine bestimmte Druckdifferenz Δp und eine bestimmte Dicke δ ausgewertet. Alle derartigen verschiedentlich vorgenommenen Umrechnungen von Dicken und Druckdifferenzen, wie sie beim Versuch vorhanden waren, auf andere Dicken und Druckdifferenzen, wie sie bei der jeweiligen Verwendung auftreten, sind nun nicht allgemein zulässig. Es ist dies nur dann berechtigt, wenn sowohl beim Versuch, nach dessen Ergebnis eine Luftdurchlaßzahl ausgewertet worden war, als auch bei der mit Hilfe dieser Zahl berechneten Luftdurchlässigkeit die laminare Strömung herrscht. Denn nur für dieses Gebiet besteht die lineare Abhängigkeit zwischen Dicke, Druckdifferenz und Luftgeschwindigkeit bzw. durchfließendem Luftvolumen, jedoch, wie aus den späteren graphischen Darstellungen zu ersehen ist, nicht mehr dann, wenn die Kurve für die Luftdurchlässigkeit von der unter 45° verlaufenden Geraden abweicht. Man wird somit für das Gebiet der laminaren Strömung, wie sie bei ganz feinporigen Stoffen bei niederen Druckdifferenzen und entsprechender Dicke vorhanden ist, den Begriff der Luftleitzahl beibehalten können, ihn jedoch derart einengen müssen, daß er nur bis zu einer gewissen, für jedes Material anzugebenden Größe der Verhältniszahl von $\frac{\Delta p}{\delta}$, die aus den Versuchswerten zu entnehmen ist, Gültigkeit hat. Die Verwertung dieser Überlegungen wird bei der später angegebenen Berechnung von Luftleitzahlen für einige Arten von Mauerputz gezeigt werden.

Bei allen eingangs erwähnten Veröffentlichungen über die Luftdurchlässigkeit poröser Stoffe wurde das experimentell gefundene Luftvolumen auf 0° C und 760 mm Barometerstand umgerechnet. Diese Reduktion ist sowohl für die Temperatur als auch für den Druck unberechtigt; denn mit einer Änderung der Lufttemperatur ändert sich auch der Porenquerschnitt des Materials, und zwar für jedes Material verschieden und in unkontrollierbarer Weise. Außerdem ändert sich auch mit der Temperatur die Zähigkeit der Luft, so daß das auf 0° reduzierte Volumen nicht dasjenige ist, das bei 0° hindurchströmen würde. Ebenso ist auch die Reduktion des Luftvolumens auf den normalen Barometerstand von 760 mm Quecksilber unberechtigt, da die Zähigkeit der Gase vom Druck unabhängig ist; es bleibt deshalb bei gegebener Druckdifferenz das durchströmende Volumen mit einer Änderung des Druckes dasselbe. Unter diesen Umständen erscheint es überflüssig, den Druck überhaupt zu erwähnen, es braucht nur die Temperatur angegeben zu werden.

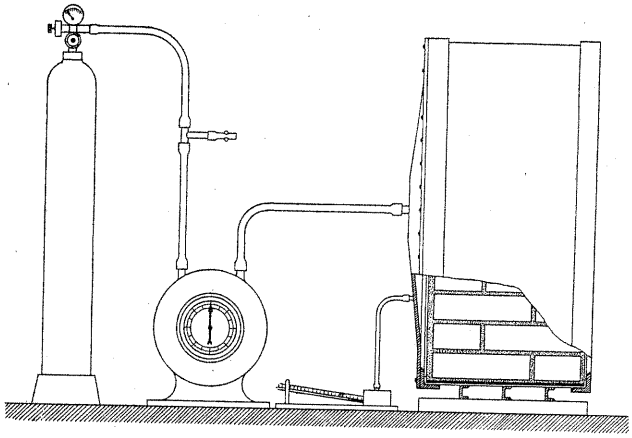

Abb. 1.

Anordnung und Durchführung der Versuche.

Die Versuchsanordnung ist aus vorstehender Abb. 1 zu ersehen. Die Luft wurde einer Druckluftflasche mit Reduzierventil entnommen, zur genauen Einregulierung und Konstanthaltung des Druckes wurde ein T-förmiges Zwischenstück eingeschaltet, durch welches nach geeigneter Abdrosselung mittels Quetschhahnes ständig ein Teil der Luft seitlich ausströmen konnte. Zur Erzeugung größerer Luftmengen diente ein Ventilator, der mit elektrischem Antriebsmotor direkt gekuppelt war; hierbei erfolgte das Einstellen und Konstanthalten des Druckes durch Regulieren der Tourenzahl des Motors mittels eines Vorschaltwiderstandes.

Zur Messung der Luftmengen wurden zwei Gasuhren verschiedener Größe verwendet; die kleinere war bis zu einer stündlichen Durchflußmenge von etwa 1,5 m³/h brauchbar, während mit der großen Uhr Mengen bis zu 22,5 m³/h gemessen werden konnten. Die Angaben ihrer Zählerwerke wurden durch Eichung nachkontrolliert. Für die kleinere Uhr erfolgte dies mit Hilfe der Junkersschen Eichvorrichtung, bei der großen Uhr wurden die Durchflußmengen mit denjenigen eines Kubizierapparates von Elster verglichen. Beide Uhren zeigten bis auf etwa 0,5% richtig, wobei allerdings Voraussetzung war, daß bei den Messungen die Trommel mindestens einmal völlig umlief.

Die Drücke wurden mittels alkoholgefüllter Mikromanometer nach Krell mit geneigtem Meßrohr bestimmt.