Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Classe

der

k. b. Akademie der Wissenschaften

zu München.

Band VIII. Jahrgang 1878.

München.
Akademische Buchdruckerei von F. Straub.
1878.

In Commission bei G. Franz.

Herr v. Pettenkofer legt vor und bespricht nachstehende Abhandlung:

Theorie des natürlichen Luftwechsels von G. Recknagel.

Erste Abhandlung.

Seit v. Pettenkofer[1]) durch die überzeugende Kraft unzweideutiger Versuche festgestellt hat, dass die Steinwände, welche die von uns bewohnten Räume einschliessen, nicht nur nicht luftdicht schliessen, sondern ansehnliche Mengen von Luft durchlassen können, ist es Aufgabe der Physik geworden, die Bedingungen zu erforschen, unter denen in bestimmter Zeit bestimmte Mengen von Luft in einen Raume eintreten oder denselben verlassen, um gleich grossen Mengen neuer Luft Platz zu machen.

Obwohl diese Forschung in erster Linie auf den Versuch angewiesen scheint, so beweist doch eine Uebersicht über die bisher durch Versuche gewonnenen Resultate, wie sie uns eben Herr C. Lang[2]) gibt, dass auf dem bisherigen Wege, wo man sich darauf beschränkt, die Gesammtmengen von Luft zu ermitteln, welche während einer gemessenen

---

1) v. Pettenkofer: Ueber den Luftwechsel in Wohngebäuden München 1858. Ursprünglich 3 Abhandlungen der naturw.-techn. Kommission der k. b. Akademie der Wissenschaften in München. 1858.

2) C. Lang: Ueber natürliche Ventilation und die Porosität von Baumaterialien. Stuttgart 1877.

Zeit in einem Raume wechseln, noch nicht sichere Grundlagen für Vorausberechnung desjenigen Effektes gewonnen werden können, welcher bei bestimmter Temperaturdifferenz sowie bei bestimmter Stärke und Richtung des Windes zu erwarten ist. Eine solche Vorausberechnung muss aber als Ziel der Forschung in's Auge gefasst werden, zunächst für jeden ventilatorisch untersuchten Raum, sodann unter Anlehnung an gewisse, sorgfältig untersuchte Typen, sogar für beliebige Räume. Zur Anbahnung dieses Zieles sollen folgende theoretische Untersuchungen dienen, welchen an geeigneter Stelle der beweisende Versuch zur Seite stehen wird.

I. Allgemeine Prinzipien.

1. Entwickelung von Luftströmen in weiten Canälen. Im Allgemeinen ist zu betonen, dass — abgesehen von den Wirkungen der Diffusion, die im folgenden nicht berücksichtigt werden, übrigens nur eine scheinbare Ausnahme bilden — ohne eine zu beiden Seiten einer Wand bestehende Druckdifferenz — Luft durch dieselbe nicht hindurch geht, ebenso wenig als sich aus ruhender Luft heraus ein Luftstrom in eine Röhre, einen Kamin, ein Schürloch entwickelt, ohne dass diese ruhende Luft eine höhere Spannkraft besitzt, als die Luft jenseits der Oeffnung. Wenn diese Druckdifferenzen vielfach unbeachtet geblieben sind, so trägt daran die Unempfindlichkeit der Messinstrumente Schuld, welche man zum Nachweis oder zur Messung solcher Differenzen verwenden wollte. Führt man durch das Zugloch eines Ofenthürchens ein gebogenes Glasrohr so ein, dass seine freie Mündung in dem windstillen Raume liegt, der sich hinter dem Thürchen befindet, so zeigt ein gewöhnliches offenes Wassermanometer, dessen einer Schenkel durch einen Kautschukschlauch mit

dem Glasrohr verbunden ist, erst dann 1 Millimeter Niveaudifferenz, wenn die Luft mit c. 4 Meter Geschwindigkeit durch das Zugloch einströmt. Die beobachtete Druckdifferenz von 1 Millimeter oder, was dasselbe ist, von 1 Kilogramm pro Quadratmeter ist die nächste Ursache des Luftzuges von 4 Meter Geschwindigkeit, und man hat sich demgemäss den Zug der Kamine vorzustellen, wie das Ausströmen von Luft aus einem (unendlich grossen) Gefässe, wo sie unter höherem Drucke steht, in einen ebenfalls unendlich grossen Raum, wo der Luftdruck geringer ist, das Zugloch bildet die Grenze dieser beiden Räume.

Die massgebende Spannungsdifferenz wird hervorgebracht durch die Gewichtsdifferenz zweier Luftsäulen, der wärmeren im Kamin und einer kälteren, deren Höhe ebenfalls vom Zugloch aus bis zur oberen Mündung des Kamins zu rechnen ist, wenn zwischen diesen beiden Stellen auch aussen freie Kommunikation stattfindet, wie z. B. bei den meisten Fabrikschlöten.

Indem nämlich die untersten Schichten der weniger dichten Säule, gleichviel ob sie selbst warm oder kalt sind, von oben her weniger stark gedrückt werden als die untersten Schichten der dichteren Säule, üben jene auch ihrerseits nach oben einen geringeren Gegendruck aus als diese. Und was von dem nach oben gerichteten Drucke gilt, gilt von der Spannkraft der Schichte überhaupt, da in Gasen und Flüssigkeiten Einseitigkeit in der Reaktion einer Schicht ausgeschlossen ist.

Die Gewichtsdifferenz von Luftsäulen gleicher Höhe, aber verschiedener Dichtigkeit ist demnach stets die entferntere Ursache der Luftströmung. Die Gewichtsdifferenz erzeugt eine Spannungsdifferenz und die Spannungsdifferenz wird zur Ursache der Luftströmung.

Wie aus dem oben angeführten Beispiel hervorgeht, sind die Druckdifferenzen, durch welche starke Luftströmungen erzeugt werden, nur klein. Zur Messung derselben bediene ich mich eines Differenzialmanometers, dessen äusserer Schenkel eng (etwa 2 bis 3 Millimeter weit) und stark geneigt ist, während der andere Schenkel einen Cylinder von 100 Millimeter Weite darstellt, und benütze Petroleum statt des Wassers.[3]) Mit Hilfe dieses Manometers, dessen äusserem Schenkel man zu diesem Zwecke am besten eine Neigung von 4 bis 5 Procent gibt, lassen sich die Druckdifferenzen, welche zur Ursache von Luftströmungen werden, genau genug messen, um die oben entwickelten Sätze auch durch den Versuch zu beweisen.

Als Versuchsobjekt dient mir ein 20 cm weites und etwa 2 Meter hohes Rohr von Eisenblech, welches unten mit einem abnehmbaren Kniestutzen versehen ist, so dass der unterste Theil des Apparates durch ein horizontales Rohrstück von 40 cm Länge gebildet wird. Etwas oberhalb der Stelle, wo das Kniestück mit dem Rohr zusammengesteckt wird, enthält jenes eine Anzahl (4) Gasbrenner, welche von aussen durch Schläuche mit der Gasleitung in Verbindung gesetzt werden können und den Heizapparat bilden. Der ganze Apparat wird, an einem Holzgestell befestigt, auf den Tisch gestellt. Das Manometer steht an einem erschütterungsfreien Ort.

Wird nun das Rohr geheizt, so entwickelt sich ein Luftstrom in den horizontalen Theil desselben, dessen grösste Geschwindigkeit leicht anemometrisch bestimmt werden kann. Führt man von aussen durch ein seitliches Loch von etwa 1 cm Durchmesser eine Glasröhre ein, deren vorderer Theil ausgezogen und an der äussersten Spitze rechwinkelig um-

---

3) Das Differenzialmanometer, seine Aichung und Anwendung ist in den Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge. Bd. 2. 1877, und im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Jahrgang 1877. S. 662 ff. beschrieben.

gebogen ist, so dass sich das offene Ende vom Luftstrome abwendet, so gibt das Manometer, dessen inneres Niveau mit dieser Glasröhre durch einen Schlauch verbunden ist, einen Ausschlag, welcher mit der beobachteten grössten Geschwindigkeit des Luftstromes in derselben gesetzmässigen Beziehung steht, welche zwischen einer Druckdifferenz (p Kilogramm pro Quadratmeter oder p^{mm} Wasserhöhe) und der durch sie erzeugten grössten Ausströmungsgeschwindigkeit (v) der Luft stattfindet. Die genannte gesetzmässige Beziehung ist für die hier in Betracht kommenden Druckdifferenzen genau genug durch die Gleichung

$$p = \frac{1}{2} m v^2$$

gegeben, worin m die Masse eines Kubikmeters der einströmenden Luft bezeichnet.

Der beschriebene manometrische Versuch gibt durchaus das gleiche Resultat, an welcher Stelle des Querschnitts man ihn anstellen mag, ob in der Mitte, wo die Strömung am stärksten ist, oder näher an der Wand oder hinter einer Platte, welche einen Theil der Einströmungsöffnung verdeckt, und das Differenzialmanometer kann somit als Anemometer verwendet werden. Nur in unmittelbarer Nähe der Wand gibt es Stellen, wo ein schwacher Gegenstrom aus dem Innern heraus stattfindet und indem er in die Glasröhre bläst, die zu messende Druckdifferenz schwächt.

Der Versuch gibt stets die wirkliche während der Strömung aktive und neue Luftmassen von aussen nach innen in Bewegung setzende Druckdifferenz und ist demnach, wenn Widerstände in der Rohrleitung zu überwinden sind, stets kleiner als diejenige Druckdifferenz, welche sich aus der Gewichtsdifferenz der warmen und kalten Säule berechnet. Die beobachtete Druckdifferenz nähert sich der aus der Gewichtsdifferenz der Luftsäulen berechneten um so mehr, je geringer die vom Luftstrome zu überwindenden Widerstände sind.

2. Messung statischer Ueberdrücke. Will man die aus der Gewichtsdifferenz berechnete Druckdifferenz vollständig nachweisen, so ist der Versuch statisch anzustellen. Man erwärmt zu diesem Zweck die Luft in einer vertikalen Röhre, deren Durchmesser einige Centimeter betragen kann, am besten dadurch, dass man die Röhre mit einem Dampfmantel umgibt.

a) Ist die Röhre oben offen — die Oeffnung selbst darf nicht so gross sein, dass sich in ihr Gegenströme der Luft ausbilden können —, während sie unten durch einen Schlauch mit dem Manometer communicirt, so erhält man an diesem das Resultat (p) der Rechnung, welches sich aus der Formel

$$p = H \,.\, 1{,}293 \, \frac{B}{760} \left(\frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha T} \right)$$

ergibt, worin H die Höhe der Röhre, B den Barometerstand, T die Temperatur der in der Röhre enthaltenen Luft und t die Temperatur der Umgebung bezeichnet. Den Ueberdruck p gibt die Rechnung in Kilogrammen pro Quadratmeter, der Versuch in ebenso viel Millimetern Wasserhöhe, was sich deckt, weil das Wasser, welches 1 Millimeter über dem Quadratmeter steht, 1 Kilogramm wiegt. Der Ausdehnungscoefficient α wird, da die Luft stets feucht sein wird, besser gleich 0,0037 genommen. Statt des eingeklammerten Ausdrucks kann mit hinreichender Annäherung

$$\frac{T - t}{270 + (T + t)},$$

also

$$p = h \cdot 1{,}293 \; \frac{B}{760} \; \frac{T - t}{270 + T + t}$$

gesetzt werden.[4])

---

4) Die stetige Zunahme der Dichtigkeit mit der Tiefe ist hier insofern ausser Acht gelassen, als bei Berechnung der Drücke der Luftsäulen, welche sich im Zimmer und dessen Umgebung befinden, stets eine in ihrer ganzen Ausdehnung gleiche mittlere Dichtigkeit zugeschrieben wird.

Da es sich im Folgenden um die Differenzen sehr kleiner Drücke handelt, ist die Zulässigkeit einer solchen Annahme nicht unmittelbar klar.

Desshalb soll das Resultat der strengen Rechnung mit dem der abgekürzten verglichen werden.

Sei am oberen Ende einer Luftsäule vom Querschnitt 1 ($\square^m$) und von der Temperatur t^0 C der Luftdruck B (Kilogr.), und B + P in der Tiefe z, so ist die Dichtigkeit an dieser Stelle

$$a \, \frac{B+P}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha t},$$

wobei mit a die normale Dichtigkeit der Luft (1,293 Kilogr. pro Cubikmeter) bezeichnet ist.

Die Zunahme dP, welche der Luftdruck erfährt, wenn die Tiefe z um dz wächst, ist dem Gewichte der elementaren Schicht von der Dicke dz gleich und somit

$$dP = a \, \frac{B+P}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot dz$$

woraus durch Integration gefunden wird

$$\log \left(1 + \frac{P}{B}\right) = \frac{a z}{760\,(1+\alpha t)}$$

oder

$$1 + \frac{P}{B} = e^{\frac{a z}{760\,(1+\alpha t)}}.$$

Berechnet man hieraus P für den Fall, dass $z = 5^m$ und $t = -10^0$ C ist, so findet man

$$P_1 = 0{,}008873 \, B.$$

Nimmt man dagegen $t = +20^0$ C, so ergibt sich

$$P_2 = 0{,}007952 \, B.$$

Ist die Temperatur (T) des Dampfes 100°, die der umgebenden Luft 20°, so beträgt bei Anwendung einer 2^m hohen Röhre die Druckdifferenz zwischen der kalten und warmen Luftsäule 0,53 Kilogramm pro $\square^m$, was sich bei dem oben genannten Manometer, dem man eine Steigung von 3% gibt, durch einen Ausschlag von c. 22^{mm} verräth.

b) Ein zweiter statischer Versuch, welchen man an den ersten leicht anschliessen kann, besteht darin, dass man die im ersten Versuch offene obere Mündung der Versuchsröhre mit dem Manometer in Verbindung setzt und dann die untere Mündung öffnet, damit sich jetzt an dieser Stelle die innere Luft mit der äusseren ins Gleichgewicht setze. Das Manometer zeigt in diesem Falle einen Ueberdruck der an dem oberen Rohrende befindlichen inneren

---

Gegenüber dieser exacten Rechnung besteht die vereinfachte darin, dass man von der Entwickelung der Exponentialgrösse

$$e^{\frac{a z}{760 (1+\alpha t)}} = 1 + \frac{a z}{760 (1+\alpha t)} + \frac{1}{2}\left[\frac{a z}{760 (1+\alpha t)}\right]^2 \cdots\cdots$$

nur die beiden ersten Glieder beibehält und demgemäss setzt

$$P = a z \frac{B}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha t},$$

was demnach etwas zu klein ist.

Führt man auch die vereinfachte Rechnung für die vorhin angenommenen Fälle numerisch durch, so erhält man

$$P_1 = 0{,}008833 \text{ B},$$
$$P_2 = 0{,}007920 \text{ B}.$$

Die genaue Differenz ist demnach

$$P_1 - P_2 = 0{,}000921 \text{ B},$$

die genäherte 0,000913 B.

Man verliert also ungefähr 1% des Werthes, und dieser Fehler darf gegenüber der durch die Beobachtung erreichbaren Genauigkeit als bedeutungslos angesehen werden.

Ist die Höhe kleiner als 5^m oder die Temperatur-Differenz kleiner als 30°, so beträgt der Unterschied zwischen der genauen und vereinfachten Rechnung weniger als 1% des Werthes.

Luft über die mit ihr in gleichem Niveau liegende äussere Luft an, der ebenso gross ist als die vorher im Niveau der unteren Mündung beobachtete Depression.

Die Nothwendigkeit dieses Ueberdrucks lässt sich leicht beweisen, wenn man bedenkt, dass sich über den im Gleichgewicht befindlichen untersten Luftschichten einerseits eine wärmere, also leichtere Luftsäule erhebt, als auf der anderen Seite, dass somit der Druck und hiemit die Spannkraft auf der wärmeren Seite um weniger abnimmt, als auf der kälteren. Oder in Zeichen:

Sei P die gleiche Spannkraft zweier Luftschichten, die sich über zwei in demselben Niveau liegenden Flächeneinheiten (Quadratmeter) befinden. Erhebt man sich, vertikal aufsteigend, aus diesem Niveau in ein anderes, so vermindert sich über jeder der beiden Flächeneinheiten die Spannkraft der Luft gerade um das in Kilogrammen ausgedrückte Gewicht der senkrechten Luftsäule, die man zurückgelegt hat. Beträgt nun das Gewicht der wärmeren Säule w Kilogramm, das der kälteren k Kilogramm, so ist die Spannkraft der am oberen Ende der warmen Säule befindlichen Luftschichte

$$P - w \text{ Kilogramm}$$

und die Spannkraft der am oberen Ende der kälteren Säule

$$P - k \text{ Kilogramm.}$$

Da nun w kleiner ist als k, so ist P—w grösser als P—k. Das oben eingesetzte Manometer gibt die Differenz (P - w) — (P—k) oder k—w.

c) Es ist nicht überflüssig, noch einen dritten Versuch anzustellen, bei welchem man die mit dem Dampfmantel umgebene Versuchsröhre während der Erwärmung unten und oben verschlossen hält, während die warme Luft an einer zwischenliegenden Stelle mit der äusseren Luft in

Verbindung steht. Setzt man dann das Manometer unten an, so erhält man nur einen Theil (p_0) der früher beobachteten Depression; und setzt man nach Verschluss der unteren Mündung den Manometerschlauch an die obere, so tritt nun der andere Theil (p_2) der Differenz k—w als Ueberdruck auf. Hat man unter den bei dem ersten Versuch angenommenen Umständen in einer Höhe von 68^{cm} die innere Luft mit der äusseren ins Gleichgewicht gesetzt und verbindet das innere Niveau des Manometers mit dem unteren Ende der Versuchsröhre, so tritt das äussere Niveau um $7{,}5^{mm}$ zurück. Wird überdies ein Schlauch vom äusseren Niveau des Manometers nach dem oberen Ende der Röhre geführt, so drückt der an diesem Ende vorhandene Ueberdruck das äussere Niveau des Manometers um weitere 14,5 Millimeter zurück, und man hat somit, da die Reductionszahl auf vertikale Millimeter Wasser 0,024 ist

$$p_0 = 0{,}18 \text{ Kilogramm}$$
$$p_2 = 0{,}35 \quad \text{,,}$$

Daraus wird zugleich klar, dass die beobachteten Spannungsdifferenzen p_0 und p_2 sich verhalten wie die Abstände der beiden Stellen, wo sie auftreten, von dem Niveau des Gleichgewichts; denn $\frac{0{,}18}{0{,}35}$ ist nahe genug gleich $\frac{68}{132}$.

3. Im Anschluss an die vorausgehenden Versuche wird leicht verständlich, dass zwei angrenzende Luftsäulen von verschiedener Temperatur nur in einem Niveau im Gleichgewicht sein können. Oberhalb dieses Niveaus besitzt die warme Luft Ueberdruck über die kalte, unterhalb die kalte über die warme.

II. Ueber den Luftwechsel, welcher in einem von freier Luft umgebenen Zimmer durch Temperaturunterschiede veranlasst wird.

1. Voraussetzungen. Von dem Gegenstande der Untersuchung soll Folgendes vorausgesetzt werden:

1) Er ist bei vollkommener Windstille durch poröse Wände von der ihn rings umgebenden freien Luft vollkommen abgeschlossen, nirgends führt ein Kanal nach aussen, welcher der Grösse seines Querschnitts wegen nicht mehr als capillare Röhre gelten kann;

2) Es findet durch die Poren seines Umschlusses hindurch ein stetiger Luftwechsel — bestehend in Eintritt und gleichzeitigem Austritt gleich grosser Mengen atmosphärischer Luft — statt.[5])

3) Zur Fixirung der Vorstellung wird die Annahme beigefügt, dass die im Innern des betrachteten Raumes befindliche Luft überall eine höhere Temperatur habe als die äussere.

---

5) Der Einfachheit wegen ist hier als Annahme aufgeführt, was bei bestehender Temperatur-Differenz als Bedingung eines stationären Zustandes bewiesen werden kann.

Zunächst ist klar, dass ein stationärer Zustand unmöglich wäre, wenn die Menge der einströmenden oder die der ausströmenden Luft überwöge. Denn in beiden Fällen würden Aenderungen in der Dichtigkeit der Zimmerluft eintreten, welche Steigerung oder Abnahme ihrer Spannkraft zur Folge haben. Indem so der Gegendruck der inneren oder der äusseren Luft wüchse, würde das Einströmen oder das Ausströmen geschwächt und so auf Ausgleichung der Luftmengen hingearbeitet werden.

Die Möglichkeit eines stationären Zustandes ohne Bewegung von Luft durch die Poren des Umschlusses ist dadurch ausgeschlossen, dass nach I 3) eine warme Luftsäule nur in einer und nicht in jeder Höhe mit einer kälteren im Gleichgewicht sein kann.

Die folgende Betrachtungsweise ist indessen auch auf den entgegengesetzten Fall anwendbar, wo die Temperatur der inneren Luft tiefer ist als die der äusseren.

Bei Erfüllung dieser Voraussetzungen sollen die Bedingungen des Problems im Folgenden kurz als „normale Umstände" bezeichnet werden.

2. Nothwendigkeit einer neutralen Zone. Durch die erste Voraussetzung — des stetigen Luftwechsels — ist die Annahme ausgeschlossen, dass die innere Luft überall höheren oder überall geringeren Druck ausübe als die äussere, weil in beiden Fällen die Strömung durch die Poren nur einseitig, entweder von innen nach aussen oder von aussen nach innen stattfände. Vielmehr muss angenommen werden, dass in gewisser Höhe der innere Druck dem äusseren, in anderer Höhe der äussere dem inneren überlegen ist.

Da die Spannungen nur durch Gewichte von Luftschichten und demnach stetig wachsen, so muss auch der Ueberdruck als Differenz solcher Spannungen, in irgend einer Höhe zwischen zwei Stellen, wo er verschiedene Vorzeichen hat, einmal Null und somit die innere mit der äusseren Luft im Gleichgewicht sein.

Diese Stelle des Gleichgewichts kann weder am Boden liegen, noch an der Decke; denn läge sie am Boden und wäre also die an demselben anliegende Luft gegen die äussere Luft im Gleichgewicht, so würde der Boden Luft weder herein noch hinauslassen, in jeder anderen Höhe aber wäre (nach I, 2b) der innere Druck dem äusseren überlegen und folglich würde im Ganzen bloss Ausströmen der Luft stattfinden, was gegen die Voraussetzung ist. Ebenso wenig kann die Stelle des Gleichgewichts an der Decke liegen, weil dann die Luft nur einströmen würde. Es bleibt also nichts übrig als die Annahme, dass das Gleichgewichts-Niveau sich innerhalb der vertikalen Begrenzung des Raumes befindet.

Von diesem Niveau aus wächst nach der Decke zu der Ueberdruck der inneren (warmen) Luft über die äussere (kalte), nach dem Boden zu der Ueberdruck der äusseren Luft über die innere.

Demnach findet unterhalb des genannten Niveaus Einströmen, oberhalb desselben Ausströmen der Luft statt.

3. Berechnung des Ueberdrucks. a) Die Grösse des Ueberdruckes (in Kilogr. pro $\square^m$ oder in Millimetern Wasserhöhe) an einer Stelle, welche um h^m von dem Niveau des Gleichgewichts absteht, wird erhalten, wenn man die Gewichte zweier Luftsäulen von der Höhe h vergleicht, welche 1 $\square^m$ zur Basis und im übrigen die Beschaffenheit derjenigen inneren und äusseren Luft haben, welche zwischen dem Niveau des Gleichgewichts und der betrachteten Stelle liegt. Die Differenz dieser Gewichte ist der fragliche Ueberdruck.

Der Beweis dieses Satzes folgt schon aus dem Vorausgehenden (I, 2 a) und wird beim Beweise des folgenden Satzes wiederholt werden.

b) Die absolute (ohne Rücksicht auf das Vorzeichen gebildete) Summe der Spannungsdifferenzen p_2 und p_0, welche zu beiden Seiten der Gleichgewichtsstelle in der Entfernung H von einander auftreten, ist gleich dem Gewichtsunterschied zwischen zwei über der Flächeneinheit aufgebauten Luftsäulen von der Höhe H, welche einerseits mit der Luft des Raumes, andererseits mit der Luft seiner Umgebung gleiche Dichtigkeit haben.

Beweis. Ist B das Gewicht einer Luftsäule, welche über der Flächeneinheit aufgebaut ist und vom Niveau des Gleichgewichts bis zum Ende der Atmosphäre reicht, q_2 das Gewicht der Luftsäule von der Basis 1, welche inwendig vom Niveau des Gleichgewichts bis zur oberen Grenze des betrachteten Raumes von der Höhe H reicht, q_0 das Gewicht der Luftsäule von der Basis 1, welche inwendig vom Niveau des Gleichgewichts bis zur unteren Grenze des betrachteten

Raumes reicht, während q'_2 und q'_0 die analogen Bedeutungen für die umgebende äussere Luft haben, so ist

$$B-q_2$$

die Druckintensität oder Spannung der inneren Luft an der oberen Grenze,

$$B-q'_2$$

die Spannung der äusseren Luft an der oberen Grenze;

$$B+q_0$$

die Spannung der inneren Luft an der unteren Grenze,

$$B+q'_0$$

die Spannung der äusseren Luft an der unteren Grenze.

Somit ist der Ueberdruck der inneren Luft über die äussere an der oberen Grenze

$$p_2 = (B-q_2)-(B-q'_2) = q'_2-q_2$$

und der Ueberdruck der äusseren Luft über die innere an der unteren Grenze

$$p_0 = (B+q'_0)-(B+q_0) = q_0'-q_0,$$

wodurch der erste Satz dargestellt ist.

Addirt man diese Gleichungen, so ist

$$p_2+p_0 = (q'_2+q'_0)-(q_2+q_0),$$

mithin gleich dem Gewichtsunterschiede der ganzen Säulen von der Höhe H.

c) Ist die Temperatur innerhalb des betrachteten Raumes durchaus gleich hoch[6]) und auch die Temperatur der Um-

---

6) Ist diese Bedingung nicht erfüllt, sondern die mittlere Temperatur unterhalb der neutralen Zone T_0, oberhalb T_2, so geben die für p_0 und p_2 folgenden Formeln, dass sehr nahe

$$\frac{p_0 (T_2 - t)}{p_2 (T_0 - t)} = \frac{h_0}{h_2}.$$

Man kann in solchen Fällen die einfache Gleichung

$$\frac{p_0}{p_2} = \frac{h_0}{h_2}$$

benützen, um annähernd die Bezirke zu finden, deren mittlere Temperagebung überall gleich, so verhalten sich die in den Abständen h_0 und h_2 vom Niveau des Gleichgewichts stattfindenden Spannungsdifferenzen (p_0, p_2), wie diese Abstände. Also

$$p_0 : p_2 = h_0 : h_2.$$

Beweis: Ist die innere Temperatur T, die äussere t, so ist mit hinreichender Annäherung

$$p_0 = h_0 \; 1{,}293 \; \frac{B}{760} \; \frac{T-t}{270+T+t},$$

$$p_2 = h_2 \; 1{,}293 \; \frac{B}{760} \; \frac{T\ \ t}{270+T+t}.$$

Durch Division beider Gleichungen folgt die Behauptung.

4. Experimentelle Bestimmung des Ueberdrucks und der Lage der neutralen Zone. Hat man sich überzeugt, dass ein Raum die Bedingungen für die Anwendbarkeit der voraussteheenden Sätze annähernd erfüllt, so lässt sich die Lage der Gleichgewichtslinie mit Hilfe des Differenzialmanometers experimentell bestimmen, indem man an Stellen wie A, B (Fig. 1) eiserne Rohrstücke durch die Wände oder Thüren hindurchsteckt und das innere Ende derselben mit dem inneren oder äusseren Niveau des Manometers durch einen Kautschukschlauch verbindet. Ist das Manometer in dem zu untersuchenden Zimmer selbst aufgestellt, und hat man das äussere Niveau mit dem oberen Rohrstück A verbunden,[7]) so steigt die Flüssigkeit im äusseren

---

turen T_0 und T_2 zu messen sind, und dann mittelst der Messungsresultate das gesuchte Verhältniss der Höhen $\left(\frac{h_0}{h_2}\right)$ corrigiren.

Hat man z. B. experimentell $p_0 = p_2$ gefunden, während die Temperatur der Umgebung 0^0, die der oberen Zimmerhälfte 22^0, die der unteren 18^0 ist, so würde $\frac{h_0}{h_2} = \frac{11}{9}$ zu nehmen sein, und die neutrale Zone nicht in $\frac{1}{2}$ sondern in $\frac{11}{20}$ der Zimmerhöhe liegen.

7) Da es nicht angeht, an das Glasröhrchen, in welchem sich das äussere Niveau des Manometers befindet, einen der Bewegung ausgesetz-

Schenkel um den Ueberdruck, welchen die innere Luft oben über die äussere übt. Dieser Ueberdruck soll mit p_2 bezeichnet werden. Setzt man nun überdies das innere Niveau mit dem unteren Rohrstück (B) in Verbindung, so erfolgt ein neues Steigen des Manometers um den Ueberdruck (p_0), welchen unten die äussere Luft über die innere besitzt.

Bezeichnet man mit h die gesuchte Höhe der neutralen Zone über dem Boden, mit H die ganze Höhe des Raumes, so gibt der Satz 3, die Proportion

$$p_0 : p_2 = h : (H-h)$$

oder

$$h = H \frac{p_0}{p_0+p_2}.$$

Wird nun ein drittes Rohr in der Höhe h über dem Boden ins Freie geführt, so zeigt das Manometer keinen Ausschlag. Zugleich überzeugt man sich, dass $p_0+p_2 = p$ ist, d. h. gleich der aus der Temperaturdifferenz der beiden Luftsäulen von der Höhe A B berechneten Spannungsdifferenz.

Die Kenntniss der neutralen Zone belehrt uns über die Vertheilung des Ventilationsgeschäftes: Was unterhalb derselben liegt, lässt Luft herein, was darüber liegt, lässt eine gleich grosse Menge Luft hinaus.

5. Annahmen und Definitionen. Die weitere Entwicklung ruht auf der Annahme, dass die in gleichen Zeiten durch dieselbe Wandfläche gehenden Luftmengen den zu beiden Seiten der Wand bestehenden Druckdifferenzen proportional sind.

Diese Annahme ist sowohl durch die allgemeinen Versuchsresultate über den Durchgang der Luft durch capillare

---

ten Schlauch anzusetzen, verbindet man dasselbe durch ein kleines Schlauchstück mit einem anderen Glasrohr, welches fest durch ein befestigtes Brettchen gesteckt ist.

Röhren als auch durch besondere Versuche[8]) über die Permeabilität einzelner Baumaterialien gestützt.

Ferner soll der Begriff der Durchlässigkeit oder

8) Vgl. C. Lang a. a. O. S 73.

Der geringste Druck, welchen Herr C. Lang anwandte, betrug 30^{mm} Wasser.

In der Absicht, das Gesetz auch für die weit kleineren Ueberdrücke zu prüfen, welche den natürlichen Luftwechsel veranlassen, stellte ich im Dezember 1876 mit einem Ziegelstein, welcher 30^{cm} lang, 15^{cm} breit und 7^{cm} dick war und kurz vorher zur Ausführung des bekannten Pettenkofer'schen Versuchs (Ausblasen eines Lichts durch den Stein hindurch) gedient hatte, einige Proben an, welche ein für die Annahme sehr günstiges Resultat gaben.

Die vier schmalen Seiten des Steins waren mit Wachs und venet. Terpentin luftdicht verstrichen, die eine Breitseite war frei, die andere mit einer Fassung von Zinkblech versehen.

Von der Fassung führte ein Kautschukschlauch nach einem Hahn, welcher in die eine Bohrung eines Kautschukpfropfs gesteckt war, der eine grosse Wasserflasche oben verschloss. Auch in der zweiten Bohrung des Pfropfs stack ein Hahn, von welchem ein Schlauch nach dem Differenzialmanometer führte. Unten hatte die Flasche einen Tubulus, welcher ebenfalls durch einen Kautschukpfropf und einen Hahn verschlossen werden konnte. Indem man diesen Hahn mehr oder weniger öffnet, hat man es in seiner Gewalt grössere oder kleinere Ueberdrücke zu erzeugen. Das Volumen des unten ausgeflossenen Wassers gibt die Menge der durch den Stein in den oberen Raum eingetretenen Luft an.

Durch dieses Verfahren erhielt ich folgende Resultate:

Druck in Millimetern Wasser	Pro Minute u. Millimeter Druck durchgelassene Luftmenge in Cub.-Cent.
$0{,}64^{mm}$	$1{,}6\ C^{cm}$
0,62	1,5
2,55	1,6
2,52	1,6
1,17	1,6

Für die Stunde und das Quadratmeter folgt daraus eine Durchlässigkeit von 2,1 Liter, was bei Reduction auf 1^m Dicke noch durch $\frac{100}{7}$ zu dividiren ist und somit den Werth 0,14 Liter erhält.

Permeabilität einer Wand so definirt werden, dass er die Anzahl der normalen Cubikmeter Luft bezeichnet, welche durch 1 Quadratmeter der Wand unter dem Ueberdruck von 1 Kilogramm (1^{mm} Wasserhöhe) in einer Stunde hindurchgehen.

Bei der Anwendung dieses Begriffs auf eine vertikale Zimmerwand begegnet man der Schwierigkeit, dass Fenster, Fensternischen und Thüren, indem sie sich nicht über die ganze Höhe der Wand erstrecken, verursachen, dass dem unteren Theile der vertikalen Begrenzung im Allgemeinen eine andere Durchlässigkeit zukommt als dem oberen. Da sich nun beide Theile in verschiedener Weise an dem Ventilationsgeschäfte betheiligen, wird es nicht immer zulässig sein, für beide dieselbe mittlere Durchlässigkeit in Ansatz zu bringen.

6) Aufstellung der Gleichung des Luftwechsels. Es soll nun der Flächeninhalt des Bodens dem Flächeninhalt der Decke gleich angenommen und beide mit dem Buchstaben f bezeichnet werden. Der Umfang des Bodens sei u, die Höhe des Zimmers H, die Entfernung der neutralen Zone vom Boden h. Ferner sei mit k_0 die Durchlässigkeit des Bodens, mit k_1 die mittlere Durchlässigkeit des unteren Theiles, mit k' die mittlere Durchlässigkeit des oberen Theiles der vertikalen Begrenzung, endlich mit k_2 die Durchlässigkeit der Decke bezeichnet. Die Grössen p_0, p_2 und $p = p_0 + p_2$ haben ihre frühere Bedeutung: p_0 bezeichnet den Ueberdruck, den die äussere Luft über die am Boden befindliche innere Luft ausübt, p_2 den Ueberdruck der an der Decke befindlichen inneren Luft über die äussere.

Dann gibt die Annahme von der Unveränderlichkeit der im Zimmer befindlichen Luftmenge die Gleichung

$$f\,k_0\,p_0 + u\,h\,k_1\,\frac{p_0}{2} = u\,(H-h)\,k'\,\frac{p_2}{2} + f\,k_2\,p_2$$ [9].

9) Dem Bedenken, welches daraus entstehen könnte, dass für den unteren oder oberen Theil der vertikalen Begrenzung ein Mittelwerth

Die linke Seite bedeutet die Luftmenge, welche in der Stunde durch den Boden und den unteren Theil der vertikalen Wände einströmt, während die rechte Seite der Gleichung die durch den oberen Theil der vertikalen Wände und durch die Decke abströmende Luftmenge darstellt.

7. Discussion der Gleichung des Luftwechsels. Aus dieser Gleichung in Verbindung mit dem Früheren lassen sich drei wichtige Sätze ableiten.

---

der Durchlässigkeit angenommen und dieser mit dem Mittelwerthe des des Drucks $\left(\frac{p_0}{2}, \frac{p_2}{2}\right)$ multiplicirt ist, begegnet man durch folgende Betrachtung.

Ist die Durchlässigkeit k eine Funktion der Höhe z, so ist die Luftmenge, welche durch einen um z.-Meter unterhalb der neutralen Zone befindlichen Streifen von der Breite dz eintritt,

$$u\, dz\, k\, P,$$

wobei mit P der an dieser Stelle vorhandene Ueberdruck bezeichnet ist

Nun ist $P = \frac{z}{h}\, p_0$, folglich die Luftmenge

$$u\, \frac{p_0}{h} \cdot k\, z\, dz.$$

Um die gesammte Luftmenge zu erhalten, welche unterhalb der neutralen Zone durch die vertikale Begrenzung geht, hat man diesen Ausdruck zwischen den Grenzen o und h zu integriren oder

$$u\, \frac{p_0}{h} \int_0^h k\, z\, dz$$

zu bilden. Da z innerhalb der Grenzen sein Vorzeichen nicht ändert, so kann man

$$\int_0^h k\, z\, dz = k_1 \int_0^h z\, dz$$

setzen, wobei k_1 irgend ein zwischen dem grössten und kleinsten Werth von k liegender mittlerer Zahlenwerth ist.

Dann wird die gesuchte Luftmenge

$$u\, \frac{p_0}{h}\, k_1\, \frac{h^2}{2} = u\, h\, k_1\, \frac{p_0}{2}$$

wie im Text angenommen wurde.

a) Setzt man für h seinen Werth $H \frac{p_0}{p}$ ein, (worin die Annahme gleichmässiger Temperaturvertheilung liegt), dividirt die Gleichung durch p und setzt $p - p_0$ an die Stelle von p_2, so erhält man der Reihe nach die Umformungen:

$$f\,k_0\,p_0 + u\,H\,k_1 \frac{p_0^2}{2\,p} = u\,H\left(1 - \frac{p_0}{p}\right) k' \frac{p_2}{2} + f\,p_2\,k_2$$

$$f\,k_0 \frac{p_0}{p} + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1 \left(\frac{p_0}{p}\right)^2 = \frac{1}{2}\,u\,H\,k'\left(1 - \frac{p_0}{p}\right)\frac{p_2}{p} + f \frac{p_2}{p}\,k_2$$

$$f\,k_0 \frac{p_0}{p} + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1 \left(\frac{p_0}{p}\right)^2 = \frac{1}{2}\,u\,H\,k'\left(1 - \frac{p_0}{p}\right)^2 + f\left(1 - \frac{p_0}{p}\right)k_2.$$

Aus der letzten in Bezug auf $\frac{p_0}{p}$ quadratischen Gleichung lässt sich dieses Verhältniss so entwickeln,[10]) dass es von den Grössen p_0 und p selbst, also auch von den Temperaturen (T, t) **unabhängig** und nur durch die Dimen-

10) Die Auflösung ist

$$\frac{p_0}{p} = -\frac{f\,k_0 + u\,H\,k' + f\,k_2}{u\,H\,(k_1 - k')} + \sqrt{\frac{u\,H\,k' + f\,k_2}{u\,H\,(k_1 - k')} + \left(\frac{f\,k_0 + u\,H\,k' + f\,k_2}{u\,H\,(k_1 - k')}\right)^2}$$

Darf $k_1 = k'$ gesetzt werden, dann folgt viel einfacher

$$\frac{p_0}{p} = \frac{\frac{1}{2}\,u\,H\,k_1 + f\,k_2}{f\,k_0 + u\,H\,k_1 + f\,k_2}.$$

Bei ungleicher Temperaturvertheilung ist zu setzen

$$h = H\,\frac{p_0\,T_2 - t)}{p\,(T_0 - t) + p_0\,(T_2 - T_0)}$$

statt des einfachen $h = H \cdot \frac{p_0}{p}$.

sionen und Durchlässigkeiten der Begrenzung bestimmt erscheint.

Somit ist auch der Werth von $h = H \frac{p_0}{p}$, oder die Lage der neutralen Zone von der Temperatur unabhängig. Sie liegt bei normalen Umständen und gleichmässiger Temperaturvertheilung, solange sich die Beschaffenheit der Begrenzung nicht ändert, ein für allemal fest.

b) Die hin und wieder gemachte Annahme, das die Decke allein alle Luft hinauslasse, welche durch die übrige Begrenzung eindringt, ist nicht haltbar.

Wäre nämlich diese Annahme zulässig, so müsste das erste Glied auf der rechten Seite der Gleichung, welches die durch den oberen Theil der vertikalen Wände hinausgehende Luftmenge darstellt, Null werden können. Also

$$u\,(H-h)\,k' \frac{p_2}{2} = 0.$$

Dieses Glied könnte aber nur dann Null sein, wenn entweder $k' = 0$, also der über der Gleichgewichtslinie liegende Theil der vertikalen Begrenzung undurchlässig, oder wenn $H = h$, somit da $h = \frac{p_0}{p} H$, $p_0 = p$ wäre.

Nun ist aber $p = p_0 + p_2$, also müsste $p_2 = 0$ sein, was unmöglich ist, weil in diesem Falle — ohne Ueberdruck — auch durch die Decke selbst keine Luft hinausgehen, somit überhaupt kein Luftwechsel, sondern nur Einströmen von Luft stattfinden würde.

c) Der Ausdruck für die einströmende Luft in der Form

$$f\,k_0\,p_0 + u\,h\,k_1 \frac{p_0}{2}$$

kann durch Einführung des Werthes von p_0 auf die Form gebracht werden

$$\left[\left(f\,k_0 + \frac{1}{2}\,u\,h\,k_1\right) h \,.\, 1{,}293\,\frac{B}{760}\right] \frac{T-t}{270+T+t}$$

Hier ist (bei gleichmässiger Vertheilung der Temperatur) der ganze Ausdruck in $\left[\ \right]$ von der Temperatur unabhängig und der Nenner $(270+T+t)$ ändert sich innerhalb derjenigen Temperaturen, welche bei der Lüftung von Zimmern in Betracht kommen, nur wenig. Somit ist der unter normalen Umständen, bei gleichmässiger Temperaturvertheilung durch Temperaturunterschied in einem Zimmer hervorgebrachte Luftwechsel nahezu der Temperaturdifferenz $(T-t)$ proportional, und es hat somit bei Räumen, welche den vorgenannten Bedingungen entsprechen, einen guten Sinn, von dem für je 1 Grad Temperaturdifferenz in einem Zimmer stattfindenden Luftwechsel zu sprechen.

Hat man für einen Raum, welcher den oben angeführten Bedingungen genügt, etwa mittelst des Pettenkoferschen Verfahrens bei Windstille und einer bestimmten gemessenen Temperaturdifferenz die Gesammtventilation ermittelt, so kann man daraus für einen späteren Fall, wo die Temperaturdifferenz eine andere geworden ist, den Luftwechsel mit hinreichender Annäherung durch einfache Rechnung finden. Betrug z. B. bei 15^0 Temperaturdifferenz der durch dieselbe veranlasste stündliche Luftwechsel 60 Cubikmeter, so entspricht einem Grade ein Luftwechsel von 4 Cubikmeter und einer später beobachteten Temperaturdifferenz von n Graden ein Luftwechsel von 4 n Cubikmeter.[11])

---

11) Aus v. Pettenkofers Versuchen folgt für das von ihm untersuchte Zimmer bei je 1^0 Temperaturdifferenz der Luftwechsel

d) Andererseits darf ausdrücklich hervorgehoben werden, dass man durch wiederholte Messungen des gesammten in einem Zimmer unter normalen Umständen bei verschiedenen Temperaturen vor sich gehenden Luftwechsels die beiden unbekannten Durchlässigkeiten k_0 und k_1 des Ausdrucks

$$f k_0 p_0 + \frac{1}{2} u H k_1 \frac{p_0^2}{p},$$

für welchen solche Messungen Werthe geben, nicht trennen kann. Man erfährt zwar, dass der Boden und ein mit der Lage der neutralen Zone zugleich bekannter unterer Theil der vertikalen Begrenzung stündlich eine gewisse Luftmenge einlassen; aber welchen Antheil daran der Boden hat und welchen der einlassende Theil der vertikalen Wände, das lässt sich durch Bestimmungen der Gesammtventilation nicht ermitteln.

8) **Luftwechsel in Zimmern von gleicher Durchlässigkeit.** Im Allgemeinen kann von dem Luftwechsel, welchen man unter normalen Umständen in einem Zimmer gefunden hat, auf den unter gleichen Umständen in einem Zimmer von anderen Dimensionen stattfindenden Luftwechsel selbst dann nicht geschlossen werden, wenn die Durchlässigkeiten in beiden Zimmern als gleich vorausgesetzt werden dürfen.

$$\frac{95}{20} = 4{,}7$$
$$\frac{75}{19} = 3{,}9$$
$$\frac{22}{4} = 5{,}5$$

Im Mittel 4,7 C^m.

Die Abweichung vom Mittel beträgt im zweiten Versuch — 14, im dritten + 4 C^m. Diese Fehler erklären sich leicht durch die Möglichkeit verschiedener Abweichungen von den normalen Umständen.

Durch Untersuchung der Bedingungen, unter denen ein solcher Schluss möglich ist, kommt man zu folgendem merkwürdigen Satze:

Ist in zwei Zimmern, welche gleiche Durchlässigkeiten haben, das Verhältniss der vertikalen Begrenzung zur Bodenfläche gleich gross, so verhalten sich die in diesen Zimmern bei gleichen Temperaturen stattfindenden Luftwechsel wie ihre Kubikinhalte.

Gelten die früheren Bezeichnungen in dem Sinn, dass die analogen Dimensionen, Durchlässigkeiten und Ueberdrücke des zweiten Zimmers sich durch Marken von denen des ersten Zimmers unterscheiden, so sind die Bedingungen ausgedrückt durch die Gleichungen

1) . . . . $k_0 = k'_0,\ k_1 = k'_1,\ k' = k'',\ k_2 = k'_2$ [12])

2) . . . . $\frac{u\,H}{f} = \frac{u'\,H'}{f'}$,

wozu noch die Voraussetzung gleicher Temperaturen

3) . . . . $\frac{p}{p'} = \frac{H}{H'}$

zwischen den Summen der Ueberdrücke und den Höhen der Zimmer liefert.

Die Behauptung geht dahin, dass die beiden Luftwechsel W und W′ mit den Kubikinhalten f H und f′ H′ in der Beziehung stehen

$$\frac{W}{W'} = \frac{f\,H}{f'\,H'}$$

12) Aus der Entwickelung folgt, dass es sowohl für diese Anwendung als für die folgende (in Nro 9) genügt, dass die Verhältnisse $\frac{k_1}{k_0}$, $\frac{k'}{k_0}$, $\frac{k_2}{k_0}$ in dem einen Zimmer so gross sind wie im andern. Die hiedurch erreichte Erweiterung dürfte indessen von geringer praktischer Bedeutung sein.

Der Beweis ergibt sich aus Folgendem.

Führt man in die Werthe $\frac{p_0}{p}$ und $\frac{p_0'}{p'}$, wie sich dieselben aus der quadratischen Gleichung in II 7a ergeben, die Bedingungen 1) und 2) ein, so findet man, dass

$$4) \ldots . \frac{p_0}{p} = \frac{p'_0}{p'},$$

woraus mit Rücksicht auf 3) folgt:

$$5) \ldots . \frac{p_0}{p'_0} = \frac{H}{H'}.$$

Nun ist unter Voraussetzung gleicher Durchlässigkeiten allgemein:

$$\frac{W}{W'} = \frac{f\,k_0\,p_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,\frac{p_0^2}{p}}{f'\,k_0\,p'_0 + \frac{1}{2}\,u'\,H'\,k_1\,\frac{p_0'^2}{p'}}$$

was auf die Form

$$\frac{f\,p_0}{f'\,p'_0} \cdot \frac{k_0 + \frac{1}{2}\,\frac{u\,H}{f}\,k_1\,\frac{p_0}{p}}{k_0 + \frac{1}{2}\,\frac{u'\,H'}{f'}\,k_1\,\frac{p_0'}{p'}}$$

gebracht werden kann.

Wegen 2) und 4) ist der zweite Bruch der Einheit gleich und folglich

$$\frac{W}{W'} = \frac{f\,p_0}{f'\,p'_0},$$

woraus durch Einführung von 5) die Behauptung erhalten wird.

9) Annähernde Berechnung des Verhältnisses von Luftwechseln. Es gibt einen nicht selten vorkommenden Fall, wo man durch Anwendung der im vorigen § aufgestellten Proportion einen genäherten Werth

für das Verhältniss zweier Luftwechsel findet, obwohl die Bedingung 2) auch nicht annähernd erfüllt ist.

Sind nämlich in zwei Zimmern die Durchlässigkeiten gleich, darf ferner ein Mittelwerth für die Durchlässigkeit der vertikalen Begrenzung angenommen und (wegen Gleichheit der Herstellungsart) die Durchlässigkeit (k_0) des Bodens gleich der Durchlässigkeit (k_2) der Decke gesetzt werden, so ist bei gleichen Temperaturen das Verhältniss der Luftwechsel um so näher dem Verhältniss der Kubikinhalte gleich, je kleiner die Durchlässigkeit der vertikalen Begrenzung gegenüber der Durchlässigkeit der Decke ist.

Die B e d i n g u n g e n sind hier

1) $k_0 = k'_0$, $k_1 = k'_1$, $k' = k''$, $k_2 = k'_2$

2) $k_1 = k'$, $k_0 = k_2$

3) $\frac{p}{p'} = \frac{H}{H'}$.

Der Beweis liegt in Folgendem:

So oft $k_1 = k'$ ist, wird die Gleichung II 7a in Bezug auf $\frac{p_0}{p}$ vom ersten Grad und

$$\frac{p_0}{p} = \frac{f k_2 + \frac{1}{2} u H k_1}{f k_0 + u H k_1 + f k_2}.$$

Setzt man überdies $k_0 = k_2$, so erhält $\frac{p_0}{p}$ den Werth $\frac{1}{2}$, d. h. die neutrale Zone liegt in der Mitte der Höhe, was leicht auch ohne Rechnung als Folge der gemachten Voraussetzungen erkannt wird.

Denselben Werth hat $\frac{p'_0}{p'}$. Somit gilt $\frac{p_0}{p} = \frac{p'_0}{p'}$ und $\frac{p_0}{p'_0} = \frac{H}{H'}$ wie in § 8.

Man erkennt nun die Wahrheit der Behauptung leicht aus der zweiten Form, in welche oben (Nr. 8) der Werth $\frac{W}{W'}$ gebracht wurde. Denn es ist

$$\frac{W}{W'} = \frac{f\,H}{f'\,H'} \cdot \frac{k_0 + \frac{1}{4}\frac{u\,H}{f}\,k_1}{k_0 + \frac{1}{4}\frac{u'\,H'}{f'}\,k_1}$$

und der zweite Bruch nähert sich der Einheit um so mehr, je kleiner $\frac{k_1}{k_0}$ ist.

Um ein Zahlenbeispiel für den Grad der Annäherung zu erhalten, nehmen wir an, zwei Zimmer haben die gleiche Höhe ($H = H' = 3{,}6^m$) und die gleiche Tiefe von 7^m, während die Breite des einen 5^m, die des anderen 10^m betragen soll. Ferner sollen die Durchlässigkeiten in beiden Zimmern gleich sein, und auch $k_1 = k'$, $k_0 = k_2$ gesetzt werden dürfen.

Dann ist

$$\frac{u\,H}{f} = 24 \, . \, \frac{3{,}6}{35}\,; \; \frac{u'\,H'}{f} = 17 \, . \, \frac{3{,}6}{35},$$

und es berechnet sich, wenn $k_1 = 0{,}2\,k_0$ angenommen wird,

$$\frac{W'}{W} = 2 \, . \, \frac{112}{109},$$

während das Verhältniss der Cubikinhalte 2 ist. Man verliert also unter diesen Umständen durch Anwendung der Proportion nur c. 3 % des wahren Werthes.

10. Experimentelle Bestimmung der Durchlässigkeiten. Aus dem Vorausgehenden folgt, dass man ohne Kenntniss der Durchlässigkeiten nur in einzelnen günstigen Fällen von dem Luftwechsel eines Zimmers auf den eines anderen schliessen kann. Man hat demnach sein Augenmerk auf jene Constanten zu richten, mit Hilfe deren

der Uebergang von einem Zimmer auf ein anderes, welches nur in den Dimensionen und Temperaturen abweicht, unter allen Umständen gemacht werden kann.[13])

---

13) Wie nothwendig es ist, die Durchlässigkeiten an den Begrenzungen der Zimmer selbst zu bestimmen, ergibt sich aus einem Vergleich der Werthe, welche für die Durchlässigkeit einzelner Baumaterialien gefunden werden, mit denjenigen, welche zur Erklärung beobachteter Luftwechsel den aus diesen Materialien aufgebauten Wänden, Decken etc. zugeschrieben werden müssen.

Nach Herrn C. Lang's Versuchen würde eine Mörteldecke von 1^{cm} Dicke unter einem Ueberdruck von 1^{mm} Wasser pro $\square^{m}$ und Stunde 0,091 C^{m} Luft durchlassen.

Wenn wir uns eine Zimmerdecke durch eine solche Mörtelschicht repräsentirt denken, scheinen wir eine für die Durchlässigkeit dieser Decke sehr günstige Annahme zu machen. Wir wollen desshalb die erwähnte Durchlässigkeit sowohl der Decke als dem Boden des Zimmers zuschreiben. Ferner sollen die Wände nur 10^{cm} dick und von Kalktuffstein — dem durchlässigsten Material — hergestellt sein, so kommt ihnen nach Herrn C. Lang's Versuchen die Durchlässigkeit 0,08 zu.

Das Zimmer sei 7^{m} lang, 5^{m} breit, $3{,}6^{m}$ hoch und die Temperaturdifferenz 20^{0} C.

Der stündliche Luftwechsel dieses Zimmers berechnet sich dann aus

$$f\,k_0\,p_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,\frac{p_0^2}{p}$$

zu 0,79 Cubikmeter.

v. Pettenkofer hat für ein viel kleineres Zimmer mit Backsteinwänden, bei 19^{0} C Temperaturdifferenz nach Verkleben aller Ritzen einen stündlichen Luftwechsel von 54 Cubikmeter, also ungefähr das Siebzigfache gefunden.

Ich selbst habe mittelst einer rein physikalischen, auf ihren möglichen Fehler leicht controlirbaren Methode, welche ich demnächst mittheilen werde, den Luftwechsel eines Zimmers, welches obige Dimensionen und Wände von rothem Sandstein hat, bei 20^{0} Temperaturdifferenz unter normalen Umständen gleich

70 Cukikmeter

gefunden, was von der Wahrheit um höchstens 7 Cubikmeter abweichen kann.

Daraus folgt, dass — wahrscheinlich in Folge der undefinirbaren Art, wie unsere Mauern, Zimmerdecken etc. hergestellt werden — die

Will man durch Bestimmung des Gesammtluftwechsels Werthe für die Durchlässigkeiten der drei Begrenzungen erhalten, so hat man zwei Zimmer auszuwählen, welchen man gleiche Durchlässigkeiten zutrauen darf, während in beiden das Verhältniss

$$\frac{u\,H}{f}$$

verschiedene Werthe hat.

In beiden Zimmern muss zu der unter normalen Umständen ausgeführten Messung der Gesammtventilation noch

---

für einzelne Baumaterialien gefundenen Durchlässigkeiten auf die aus denselben aufgeführten Mauern .... nicht übertragen werden dürfen.

Um eine direkte Controle für dieses Urteil zu gewinnen, habe ich ein eisernes Rohr durch die 0,80^{m} dicke Mauer des vorgenannten Zimmers getrieben, mit der Absicht in verchiedenen Dicken den Ueberdruck der äusseren Luft über die innere manometrisch zu bestimmen. Ich kam dabei zufällig zuerst auf einen Stein von etwa 20^{cm} Dicke. Nachdem dieser durchbohrt war, glitt das Rohr beinahe widerstandslos 40^{cm} vorwärts und stiess dann auf den Widerstand der äusseren Steinlage.

Man erhält dadurch das in Fig. 2 gegebene Bild des vertikalen Querschnitts einer solchen Mauer, von dessen Richtigkeit man sich hier bei jedem Neubau überzeugen kann. Der innere Raum ist mit kleinen, sehr unregelmässigen Abfallstücken so ausgefüllt, dass dem Durchgang der Luft kein Widerstand entgegensteht. Nach jeder Steinhöhe folgt eine unregelmässige Mörtelschicht. Die äussere Steinlage, welche in dem untersuchten Fall ohne Bewurf ist, leistet der Luft ebenfalls sehr wenig Widerstand; denn der Druck wurde in dem Raume des Gerölls merklich ebenso gross gefunden als in der freien Luft.

So bleibt im Grunde nicht viel mehr als der innere Bewurf, der meistens von Rissen und Sprüngen durchzogen ist, welche nur ganz oberflächlich gedeckt sind.

Ebenso habe ich mich überzeugt, dass die zwischen den Diehlen des Fussbodens befindlichen Zwischenräume der Luft einen beinahe freien Durchgang gestatten: an einem bloss durch die Diehlen gesteckten Rohr liess sich kein Ueberdruck nachweisen, derselbe tritt erst dann merklich hervor, wenn das Rohr in den weiter unten mit Schlacken vermengten Sand eindringt.

die (manometrische) Messung von p_0 und p'_0 kommen, d. h. derjenigen Ueberdrücke, welche die äussere Luft unmittelbar am Boden über die innere besitzt. Die Summen $p = p_0 + p_2$ und $p' = p'_0 + p'_2$ können aus den Temperaturen und Zimmerhöhen berechnet oder, was oft bequemer ist, ebenfalls gemessen werden. Da in jedem der beiden Zimmer sowohl die Menge der einströmenden Luft als auch die der abströmenden dem gefundenen Werthe der Gesammtventilation gleich gesetzt werden kann, erhält man durch zwei vollständige Messungen zwei paar Gleichungen von der Form

$$\left.\begin{aligned} a &= f\,k_0\,p_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,\frac{p_0^2}{p} \\ b &= f'\,k_0\,p'_0 + \frac{1}{2}\,u'\,H'\,k_1\,\frac{p'^2_0}{p'} \end{aligned}\right\} 1)$$

$$\left.\begin{aligned} a &= f\,k_2\,p_2 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k'\,\frac{p_2^2}{p} \\ b &= f'\,k_2\,p'_2 + \frac{1}{2}\,u'\,H'\,k'\,\frac{p'^2_2}{p'} \end{aligned}\right\} 2)$$

in welchen die vier Unbenannten k_0, k_1 und k', k_2 paarweise vorkommen, während alles Uebrige bekannt ist.

11. Zweite Methode die Durchlässigkeiten zu finden. Die in Nr. 10 angegebene Methode ist auf die Voraussetzung gegründet, dass Zimmer gefunden werden können, von denen man annehmen darf, dass sie gleiche Durchlässigkeiten haben, ohne dass man diese Durchlässigkeiten selbst kennt.

Obwohl man über diese Voraussetzung nicht hinweg kommen wird, wenn man von dem bekannten Luftwechsel eines Zimmers auf den noch unbekannten eines anderen schliessen will, so scheint es doch von einem anderen Gesichtspunkte aus wünschenswerth, eine experimentelle Methode zu besitzen, welche die Durchlässigkeiten kennen lehrt, ohne uns noch auf ein zweites Zimmer anzuweisen.

Eine solche Methode will ich nun angeben. Sie setzt voraus, dass man für den vertikalen Theil der Begrenzung eine mittlere Durchlässigkeit ($k_1 = k'$) annehmen darf. Das Verfahren ist folgendes.

1) Man bestimmt die Lage der neutralen Zone durch Messung des am Boden stattfindenden Ueberdrucks (p_0) und Berechnung (oder Messung) der Summe $p = p_0 + p_2$.

Dadurch erhält man einen Werth für die linke Seite der Gleichung

$$1) \ldots . \frac{p_0}{p} = \frac{f\,k_2 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1}{f\,k_2 + u\,H\,k_1 + f\,k_0}.$$

2) Man misst den gesammten Luftwechsel (a) nach von Pettenkofer's Methode. Dadurch erhält man die Gleichung

$$2) \ldots . (p - p_0)\,f\,k_2 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,\frac{(p - p_0)^2}{p} = a.$$

Diese beiden Messungen können leicht gleichzeitig ausgeführt werden.

3) Man bahnt der Luft einen neuen Weg dadurch, dass man einen bisher verschlossenen Kanal, der sich am besten nahe am Boden (z. B. im untersten Theil der Thüre) oder nahe an der Decke befindet, öffnet.

Die Luftmenge, welche durch diesen Kanal strömt, wird gemessen. Zugleich beobachtet man die Veränderungen, welche durch das Oeffnen des Kanals in der Druckvertheilung vor sich gehen.

Liegt der Kanal nahe am Boden, so sinkt bei seiner Eröffnung die neutrale Zone, liegt er an der Decke, so steigt sie, und diese Verschiebungen geben sich durch Veränderungen im Werthe von p_0 kund, während $p = p_0 + p_2$

constant bleibt, weil es nur von der Höhe des Zimmers und den Temperaturen abhängt.

Das Verhältniss der durch den Kanal stündlich ein- oder ausströmenden Luftmenge zu der gleichzeitigen Aenderung des Werthes von p_0[14]) ist der Werth des Ausdruckes $f k_0 + u H k_1 + f k_2$, welcher auf der rechten Seite der ersten Gleichung den Nenner bildet.

Diesen Ausdruck, der sich aus 3 Summanden zusammensetzt, welche uns sagen, was jede einzelne Wand bezüglich der Lüftung zu leisten vermag und leistet, wenn der Ueberdruck 1^{mm} Wasser beträgt, will ich das Lüftungsvermögen des Zimmers nennen.

Dann lässt sich der eben aufgestellte Satz so aussprechen:

Tritt unter normalen Umständen bei constanter Temperatur ein constanter Luftstrom in ein Zimmer ein oder aus demselben aus, welcher stündlich m-Kubikmeter Luft zu- oder abführt, so ist während der Dauer dieser Strömung der Werth des am Boden stattfindenden Ueberdrucks der äusseren Luft über die innere um δ kleiner oder grösser als ohne den Strom, und man erhält das Lüftungsvermögen (L) des Zimmers, wenn man m durch δ dividirt.

In Zeichen

$$f k_0 + u H k_1 + f k_2 = L = \frac{m}{\delta}.$$

Dieser nützliche Satz, welcher u. A., wenn das Lüftungsvermögen eines Lokals einmal bekannt ist, die Prüfung

---

14) Statt der Aenderung von p_0 kann auch die Aenderung des in irgend einer anderen Höhe bestehenden Ueberdrucks beobachtet werden, da sich alle Ueberdrücke um die gleiche Grösse ändern.

der Leistung einer in demselben einseitig thätigen Ventilationsanlage auf die manometrische Messung der Verschiebung der neutralen Zone zurückführt, wird leicht bewiesen, indem man die Gleichung des natürlichen Luftwechsels

$$f\,k_0\,p_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,(2\,p_0 - p) = f\,k_2\,(p - p_0)$$

von der Gleichung des künstlich gesteigerten Luftwechsels

$$m + f\,k_0\,p'_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,(2\,p'_0 - p) = f\,k_2\,(p - p'_0)$$

abzieht. Man erhält

$$m = f\,k_0\,(p_0 - p'_0) + u\,H\,k_1\,(p_0 - p'_0) + f\,k_2\,(p_0 - p'_0)$$

oder

$$\frac{m}{p_0 - p'_0} = f\,k_0 + u\,H\,k_1 + f\,k_2,$$

was zu beweisen war.

Die Form des Beweises bezieht sich auf den Fall des Einströmens, wobei p_0 vermindert wird. Für den Fall des Abströmens ändert sich zugleich das Vorzeichen von m und von $p_0 - p'_0$, was auf den Werth des Quotienten keinen Einfluss hat.

Beispiel. Ein Zimmer, welches 3,6^m hoch, 7^m lang und 5^m breit ist, hat eine Temperatur von 20° C, seine Umgebung 0° C.

1) Die neutrale Zone liegt in $\frac{13}{32}$ der Höhe, weil $p_0 = 0{,}13$, $p = 0{,}32$ gefunden wird.

2) Der gesammte Luftwechsel beträgt 39,9 C^m per Stunde.

3) Durch einen nahe am Boden befindlichen Kanal von 1 □ Decimeter Querschnitt strömen 28 C^m per Stunde ein, während $p'_0 = 0{,}08$ und $p = 0{,}32$ ist.

Man hat nun

$$1)\ \frac{13}{32} = \frac{f\,k_2 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1}{L},$$

$$2)\ 0{,}19\,f\,k_2 + \frac{(0{,}19)^2}{64}\,u\,H\,k_1 = 39{,}9,$$

$$3)\ L = \frac{28}{0{,}05} = 560.$$

Daraus erhält man

$$k_0 = 8{,}3,$$
$$k_1 = 1{,}0,$$
$$k_2 = 5{,}3.$$

Die Ueberdrücke p_0 ... werden leicht auf eine Einheit der zweiten Dezimale genau, d. h. so erhalten, dass der Fehler kleiner ist als 0,005, wenn man der Messröhre des Manometers eine Steigung von c. 3 % gibt, und, um den Nullpunkt sicher zu eliminiren, den Schlauch abwechselnd an das innere und äussere Niveau ansetzt.

Die Unsicherheit des Werthes von L ist demnach auf höchstens 10 % anzuschlagen.

12) Der dritte Versuch, welcher in Nro 11 angegeben wurde, belehrt uns zugleich über das Mass, in welchem der Effekt der Porenventilation **abnimmt**, sobald ein durch weite Oeffnungen zugelassener oder auch durch besondere Vorrichtungen (Ventilatoren) eingetriebener Luftstrom sich am Ventilationsgeschäfte betheiligt. Die Abnahme ist durch den Ausdruck $(p_0 - p'_0)\ [f\,k_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1]$ gegeben und somit der Druckabnahme $(p_0 - p'_0)$ proportional.

Setzt man $p_0 = 0{,}08$ mit den übrigen, nun bekannten Werthen in den Ausdruck, welcher die durch die Poren **einströmende** Luftmenge darstellt:

$$f\,k_0\,p'_0 + \frac{1}{2}\,u\,H\,k_1\,\frac{p_0'^2}{p},$$

so erhält man 24,1 C^m, während vorher, ehe der Canal geöffnet wurde, durch die Poren 39,9 C^m einströmten.

Durch Oeffnen des Canals, der 28 C^m einliess, steigerte sich demnach der Luftwechsel von 39,9 C^m auf 24,1 + 28,0 oder 52,1 C^m, und die Zunahme betrug (in Folge der Abnahme des Effekts der Porenventilation) nur 12,2 C^m.

Ganz analog wirkt die Oeffnung eines Abzugscanals und einer Absauge-Vorrichtung. Stets ist der durch solche Vorrichtungen gesteigerte Luftwechsel kleiner als die Summe aus der durch den Canal strömenden Luftmenge und dem bei geschlossenem Canal stattfindenden Luftwechsel.

Fügt man zu dem einlassenden Canal noch einen Abzugs-Canal, so wird die Porenventilation nur dann nicht geschwächt, wenn durch beide Canäle gleich grosse Luftmengen strömen.

In einer folgenden Abhandlung hoffe ich den Einfluss nachzuweisen, welchen angrenzende geschlossene Räume auf den Luftwechsel eines Zimmers ausüben.

Uebersicht der hauptsächlichsten Resultate der ersten Abhandlung.

1) Hat die Luft eines Zimmers eine constante Temperatur, welche höher ist als die Temperatur seiner Umgebung, und hat auch diese Umgebung, welche frei und windstill vorausgesetzt wird, constante Temperatur, so findet in dem Zimmer ein Luftwechsel statt, welcher einem stationären Zustand zustrebt.

Ist dieser Zustand erreicht, so befindet sich in irgend einer Höhe, welche geringer ist als die Höhe des Zimmers, die innere Luft mit der äusseren im Gleichgewicht. Unterhalb der neutralen Zone strömt, vermöge eines Ueberdrucks der äusseren Luft über die innere, Luft in das Zimmer ein, oberhalb derselben strömt vermöge eines Ueberdrucks der inneren Luft über die äussere in derselben Zeit gleichviel Luft aus.

2) Ist die Temperatur in der ganzen Höhe des Zimmers gleich, so ist die Lage der neutralen Zone dadurch bestimmt, dass ihre Abstände von Boden und Decke sich wie die im Niveau dieser Grenzflächen bestehenden Ueberdrücke verhalten.

Unter derselben Voraussetzung ist die Lage der neutralen Zone von den Temperaturen des Zimmers und seiner Umgebung unabhängig, und nur durch die Dimensionen und Durchlässigkeits-Verhältnisse bestimmt.

3) Der stationäre Luftwechsel eines Zimmers ist dem Unterschiede zwischen seiner Temperatur und der Temperatur seiner Umgebung nahezu proportional.

4) Ohne Kenntniss der Durchlässigkeiten lässt sich nur in einzelnen Fällen von dem Luftwechsel eines Zimmers auf den eines anderen von gleichen Durchlässigkeiten schliessen. In diesen Fällen ist das Verhältniss der Luftwechsel gleich dem der Kubikinhalte.

5) Eine Methode die Durchlässigkeiten zu finden besteht in Vergleichung des Luftwechsels zweier Zimmer von gleichen Durchlässigkeiten und verschiedenen Dimensionen bei gleichzeitiger Messung der Temperatur und Bestimmung der Lage der neutralen Zone.

6) Eine zweite Methode, die Durchlässigkeiten eines Zimmers zu finden, ist begründet auf Messung seines gesammten Luftwechsels, Bestimmung der Lage seiner neutralen Zone und Eröffnung eines neuen Luftcanales. Dabei ist der Satz anzuwenden: Das gesammte Lüftungsvermögen eines Zimmers ist dem Quotienten aus der durch den Canal strömenden Luftmenge und der durch das Oeff-

nen des Canals an irgend einer Stelle des Zimmers bewirkten Aenderung des Ueberdrucks gleich.

7) Die durch eine besondere Ventilationsanlage bewirkte Abnahme des Effekts der Porenventilation ist der gleichzeitig mit Bethätigung der Ventilationsanlage eintretenden Aenderung des an irgend einer Stelle des Zimmers bestehenden Ueberdrucks proportional.

Figuren.

Fig. 1.

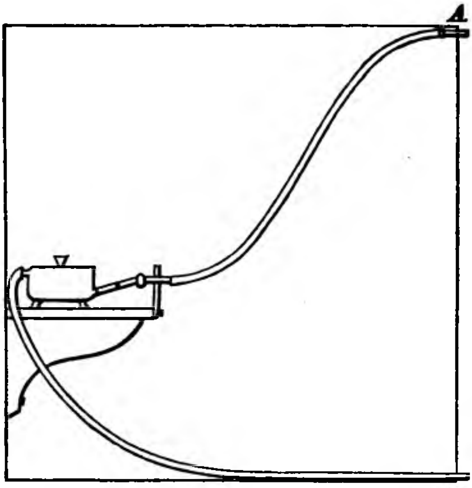
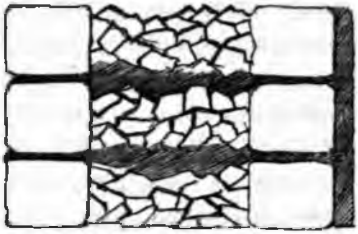


Fig. 2.



Zweite Abhandlung.

Die erste Abhandlung enthielt die Theorie des Luftwechsels für ein Gemach, welches durchaus von freier ruhiger Luft umgeben ist. Es wurde gezeigt, wie dieser Luftwechsel aus den Temperaturen, Dimensionen und Durchlässigkeiten berechnet werden kann, auch wurden Methoden angegeben, die Durchlässigkeiten der Begrenzungen experimentell zu bestimmen.

Es soll nun die Voraussetzung der allseitig freien Umgebung aufgegeben und untersucht werden, welche Veränderungen gegenüber dem unter normalen Umständen stattfindenden Luftwechsel eines Gemachs eintreten, wenn einzelne Theile der Begrenzung nicht mehr von freier Luft umgeben sind, sondern den betrachteten Raum von ebenfalls abgeschlossenen Räumen trennen. Und zwar soll zunächst der Fall betrachtet werden, wo über oder unter einem Gemach sich ein abgeschlossener Raum befindet, welcher von jenem durch eine poröse Wand getrennt ist. In einer dritten Abhandlung soll untersucht werden, welchen Einfluss ein seitlich angrenzender abgeschlossener Raum auf den Luftwechsel eines Zimmers ausübt. Endlich soll die Aufgabe, den Antheil zu berechnen, welchen bei einer beliebigen Combination von Gemächern jede einzelne Wand an dem durch Temperaturunterschied hervorgerufenen Luftwechsel nimmt, allgemein gelöst werden.

Luftwechsel in zwei abgeschlossenen Gemächern, welche durch eine horizontale Wand von einander getrennt, im Uebrigen aber von freier Luft umgeben sind.

I.

Das eine der beiden Gemächer habe die Temperatur der freien Umgebung, das andere eine höhere Temperatur.

1) Befindet sich ein abgeschlossenes Gemach von der Temperatur der Umgebung über einem wärmeren Zimmer, so kann man sich vorstellen, dass der obere Raum vorher vermöge offener Fenster und Thüren einen Theil der „freien Umgebung" des unteren bildete und die Veränderungen studiren, welche das Schliessen der Fenster und Thüren im Luftwechsel dieses Raumes selbst und im Luftwechsel des unter ihm befindlichen wärmeren Zimmers hervorbringt. Von der Dicke der horizontalen Trennungsschicht soll dabei abgesehen werden.

Zunächst ist klar, dass durch die Decke des unteren Zimmers, welche zugleich den Fussboden des oberen bildet, Luft aus dem unteren Zimmer in das obere einströmt, weil im Niveau der Decke ein Ueberdruck (p_2) gegen die freie Luft vorhanden ist (vgl. S. 435 Nro 2), und die Luft des oberen Zimmers im ersten Moment nach Verschluss der Fenster und Thüren noch alle Eigenschaften der freien Luft besitzt.

Durch dieses Einströmen von Luft in das obere Zimmer wird daselbst die Luft verdichtet, gewinnt nach allen Seiten hin Ueberdruck (ϱ) über die äussere Luft und setzt auch dem Drucke, der die Luft von unten durch die Decke treibt, diesseits einen Gegendruck (ϱ) entgegen. Ein stationärer Zustand wird im oberen Zimmer dann eingetreten sein, wenn ϱ so gross geworden ist, dass ebenso viel Luft als durch den Fussboden einströmt von dem Ueberdrucke ϱ durch die übrige Begrenzung hinausgetrieben wird.

Damit ist jedoch die Aufgabe noch nicht vollständig erklärt. Vielmehr besteht durch Vermittelung der porösen Scheidewand zwischen den über einander liegenden Zimmern eine so enge Beziehung, dass der Luftwechsel des einen ohne den des anderen nicht verstanden werden kann.

Dadurch nämlich, dass im oberen Zimmer der Gegendruck ϱ entsteht, wird offenbar die aus dem unteren Zimmer durch die Decke abströmende Luftmenge vermindert und folglich die früher (bei allseitig freier Umgebung) im unteren Zimmer zwischen einströmender und abströmender Luft bestandene Gleichung gestört. Es wird sich als Ausdruck eines neuen stationären Zustandes eine neue Gleichung bilden, in welcher sich der geringeren Menge von abströmender Luft eine geringere Menge einströmender Luft gegenüberstellt. Damit dieses möglich wird, muss im unteren Zimmer der Ueberdruck p_0, den die äussere Luft am Boden über die innere besitzt, abnehmen, p_2 um ebensoviel wachsen und folglich eine Verlegung der neutralen Zone nach unten eintreten.

Es gehe p_0 über in $p_0 - \gamma$, so muss p_2 auf $p_2 + \gamma$ anwachsen, damit die Summe (p) beider, welche nur von der Zimmerhöhe und den Temperaturen abhängt, constant bleibt. Die Gleichung für das untere Zimmer wird dann

$$f\,k_0\,(p_0 - \gamma) + u\,h\,k_1\,\frac{p_0 - \gamma}{2} =$$

$$u\,(H - h)\,k_1\,\frac{p_2 + \gamma}{2} + f\,k_2\,(p_2 + \gamma - \varrho) \; . \; . \; . \; . \qquad 1),$$

wobei wie früher mit f der Flächeninhalt des Bodens sowie der Decke, mit u der Umfang derselben, mit H die Höhe des Zimmers, mit h die Höhe der neutralen Zone über dem Boden, ferner mit k_0 die Durchlässigkeit des Bodens, mit k_2 die Durchlässigkeit der Decke bezeichnet und für die ganze vertikale Begrenzung eine mittlere Durchlässigkeit k_1 angenommen ist.

Die Gleichung des Luftwechsels für das obere Zimmer ist

$$f k_2 (p_2 + \gamma - \varrho) = \varrho (u H' k_5 + f k_6) \ldots . \qquad 2),$$

wobei k_5 die mittlere Durchlässigkeit der vertikalen Begrenzung, k_6 die Durchlässigkeit der Zimmerdecke, H' die Höhe des oberen Zimmers bezeichnet. u, f, der Umfang und die Fläche des Bodens und der Decke, sind im oberen Zimmer ebenso gross angenommen wie im unteren.

Aus diesen beiden Gleichungen kann man ϱ und γ berechnen, d. h. in ihrer Abhängigkeit von den Eigenthümlichkeiten der beiden Zimmer und deren Temperaturen (T, t) nachweisen. Bezeichnet man das Lüftungsvermögen $(f k_2 + f k_6 + u H' k_5)$ des oberen Zimmers mit L', das des unteren mit L (vgl. S. 455), und setzt der Reihe nach l_0, l_1, l_2, l_5, l_6 für $f k_0$, $u H k_1$, $f k_2$, $u H' k_5$, $f k_6$, so dass

$$L = l_0 + l_1 + l_2$$
$$L' = l_2 + l_5 + l_6,$$

so wird aus der zweiten Gleichung

$$L' \varrho - l_2 \gamma = l_2 p_2 \qquad (2^a$$

Mit Benützung der Proportion

$$\frac{h}{H} = \frac{p_0 - \gamma}{p}$$

kann die erste Gleichung umgeformt werden in

$$l_0 (p_0 - \gamma) + l_1 \frac{(p_0 - \gamma)^2}{2 p} = l_1 \frac{(p_2 + \gamma)^2}{2 p} + l_2 (p_2 + \gamma - \varrho)$$

und wegen $p_0 + p_2 = p$ in

$$l_0 (p_0 - \gamma) + \frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2 - 2 \gamma) = l_2 (p_2 + \gamma - \varrho).$$

Subtrahirt man diese Gleichung von der auf normale Umstände bezüglichen

$$l_0 \, p_0 + \frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2) = l_2 \, p_2,$$

so erhält man

$$l_0 \gamma + l_1 \gamma = l_2 (\varrho - \gamma)$$

oder

$$L \gamma = l_2 \varrho. \qquad (1^a.$$

Aus (1^a und (2^a wird

$$\left.\begin{aligned} \varrho &= p_2 \frac{l_2 \, L}{L \, L' - l_2^2} \\ \gamma &= p_2 \frac{l_2^2}{L \, L' - l_2^2}, \end{aligned}\right\} \ldots F. 1$$

worin noch der Werth von p_2, nämlich $p \dfrac{l_0 + \frac{1}{2} l_1}{L}$ substituirt werden kann, während p aus $H \, 1{,}293 \dfrac{B}{760} \dfrac{T - t}{270 + T + t}$ gefunden wird.

Der Luftwechsel des oberen (kalten) Zimmers ist gegeben durch

$$(W') = l_2 (p_2 + \gamma - \varrho) \ldots . F. 2$$

was durch den Fussboden aus dem unteren Zimmer kommt, oder auch durch

$$(W') = (l_5 + l_6) \, \varrho \ldots . F. 2^a$$

was durch die vertikale Begrenzung und die Decke in's Freie strömt.

Der Luftwechsel W des unteren (warmen) Zimmers besteht aus der Grösse $l_2 (p_2 + \gamma - \varrho)$ (die durch die Decke abströmt) und aus der Luftmenge

$$l_1 \frac{(p_2 + \gamma)^2}{2 \, p},$$

welche durch den oberen Theil der vertikalen Begrenzung entweicht, so dass

$$W = l_2 (p_2 + \gamma - \varrho) + l_1 \frac{(p_2 + \gamma)^2}{2 p} \quad .... \text{F. } 3$$

oder

$$W = l_0 (p_0 - \gamma) + l_1 \frac{(p_0 - \gamma)^2}{2 p} \quad .... \text{F. } 3^a$$

worin das erste Glied die durch den Fussboden, das zweite Glied die durch den unteren Theil der vertikalen Begrenzung einströmende Luftmenge bezeichnet.

Beispiel. Nehmen wir $k_0 = k_2 = k_6 = 5\,k_1$, $k_1 = k_5 = 1$, $H = H' = 3{,}6^m$, $u = 24^m$, $f = 35\,\square^m$, so folgt $p_0 = p_2$. Ferner sei die Temperatur des unteren Zimmers 20^0 C, die des oberen und der Umgebung 0^0 C, so ist $p = 0{,}32$, $p_0 = 0{,}16$, $\gamma = 0{,}031^{mm}$ und $\varrho = 0{,}076^{mm}$.

Der Luftwechsel des unteren (warmen) Zimmers betrug vorher, bei freier Umgebung:

$$l_2\, p_2 + l_1 \frac{p_2^2}{2 p}$$

oder 31,5 C^m.

Nach dem Schliessen der oberen Fenster und Herstellung des neuen stationären Zustandes beträgt er noch 24,9 C^m.

Das obere kalte Zimmer erhält durch das unter ihm liegende warme einen Luftwechsel von

$$l_2 (p_2 + \gamma - \varrho)$$

oder 20,1 C^m, während, wenn das untere Zimmer ebenfalls kalt wäre, der Luftwechsel Null sein würde.

Durch Oeffnen der Fenster des oberen Zimmers steigert sich der Luftwechsel desselben von 20,1 C^m auf

$$l_2\, p_2$$

oder 28,0 C^m, und der des unteren Zimmers von 24,9 auf 31,5 C^m.

Es lassen sich demnach, wenn die Dimensionen, Durchlässigkeiten und Temperaturen bekannt sind, alle den Luftwechsel beider Zimmer betreffenden Fragen beantworten.

Dabei ist die Voraussetzung gemacht, dass trotz der ansehnlichen Luftmengen, welche stündlich aus dem unteren Zimmer in das obere übergehen, dieses seine Temperatur (t) beharrlich beibehält. Erhöht sich die Temperatur des oberen Zimmers, so hat eine andere Betrachtung Platz zu greifen, welche für den Fall eines erreichten Beharrungs-Zustandes weiter unten durchgeführt werden wird.

Die Voraussetzung constanter Temperatur wird wohl mit grösserem Rechte gemacht, wenn das kalte Zimmer unterhalb des wärmeren liegt, während letzteres eine Wärmequelle besitzt.

2) Befindet sich das warme Zimmer von der Temperatur T' über einem kalten von der Temperatur (t) der freien Umgebung, und schliesst man die vorher offenen Fenster des unteren Zimmers, so treten folgende Veränderungen ein.

Da die an der Decke des unteren Zimmers befindliche Luft zunächst noch die Spannung der äusseren besitzt, welche um p_4 grösser ist als die Spannung am Boden des oberen Zimmers, so geht ein Luftstrom durch die Decke des kalten Zimmers nach dem warmen. Dadurch nimmt die Dichtigkeit der Luft im unteren Zimmer ab, und ihre Spannung wird allenthalben (um γ) geringer als die der äusseren Luft.

In Folge dessen strömt sowohl durch den Boden als durch die gesammte vertikale Begrenzung von aussen Luft in das kalte Zimmer. Ihre Menge ist

$$(l_0 + l_1)\,\gamma.$$

Diese Luftmenge strömt durch die Decke allein nach dem oberen Zimmer ab.

Die über dem Boden dieses Zimmers befindliche Luft besass vorher den Minderdruck p_4 gegenüber der unterhalb des Bodens befindlichen Luft. Dieser Minderdruck reducirt sich jetzt auf $p_4 - \gamma$, und es strömt somit durch den Boden des oberen Zimmers weniger Luft ein als vorher. Der stationäre Zustand stellt sich dadurch her, dass sich auch die Menge der abströmenden Luft vermindert, und diese Verminderung vollzieht sich dadurch, dass im oberen Zimmer die neutrale Zone nach oben rückt. Es wächst p_4 auf $p_4 + \varrho$ an, während p_6 um ϱ abnimmt, da die Summe beider $p' = p_4 + p_6$ constant bleibt.

Die Gleichungen des stationären Luftwechsels sind:

1) für das untere (kalte) Zimmer:

$$(l_0 + l_1)\,\gamma = l_2\,(p_4 + \varrho - \gamma) \ldots . \qquad (3;$$

2) für das obere (warme) Zimmer:

$$l_2\,(p_4 + \varrho - \gamma) + l_5\,\frac{(p_4 + \varrho)^2}{2\,p'} =$$

$$l_5\,\frac{(p_6 - \varrho)^2}{2\,p'} + l_6\,(p_6 - \varrho) \ldots . \qquad (4.$$

Reducirt man mittelst $p_4 + p_6 = p'$, so folgt zunächst

$$l_2\,(p_4 + \varrho - \gamma) + \frac{1}{2}\,l_5\,(p_4 - p_6 + 2\,\varrho) = l_6\,(p_6 - \varrho),$$

woraus durch Anwendung der Gleichung des normalen Luftwechsels erhalten wird

$$L'\varrho = l_2\,\gamma. \qquad (4^a.$$

Da ausserdem noch

$$L\gamma - l_2\,\varrho = l_2\,p_4 \qquad (3^a,$$

so wird

$$\left.\begin{aligned} \varrho &= p_4\,\frac{l_2^{\,2}}{L L' - l_2^{\,2}} \\ \gamma &= p_4\,\frac{l_2\,L'}{L L' - l_2^{\,2}} \end{aligned}\right\}\ \text{F. 4.}$$

Für p_4 kann sein Werth

$$p' \frac{l_6 + \frac{1}{2} l_5}{L'}$$

eingesetzt werden, wobei

$$p' = H' \, 1{,}293 \, \frac{B}{760} \, \frac{T' - t}{270 + T' + t} \, .$$

Die Formeln für den Luftwechsel im oberen Zimmer sind

$$W' = l_2 (p_4 + \varrho - \gamma) + l_5 \frac{(p_4 + \varrho)^2}{2\,p} , \ldots \text{ F. 5}$$

wobei das erste Glied die durch den Boden, das zweite die durch den unteren Theil der vertikalen Begrenzung des oberen Zimmers aus dem Freien einströmende Luftmenge bezeichnet, oder

$$W' = l_5 \frac{(p_6 - \varrho)^2}{2\,p'} + l_6 (p_6 - \varrho) \ldots \text{ F. } 5^a$$

wobei das erste Glied die durch den oberen Theil der vertikalen Begrenzung, das zweite die durch die Decke entweichende Luftmenge angibt.

Im unteren Zimmer ist

$$(W) = l_2 (p_4 + \varrho - \gamma) \ldots \text{ F. 6}$$

die durch die Decke abströmende Menge, während

$$(W) = (l_0 + l_1)\,\gamma \ldots \text{ F. } 6^a$$

die aus dem Freien einströmende Menge bezeichnet.

3) Vergleicht man diese Resultate mit den in Nro 1) erhaltenen, so ergibt sich, dass p_2 durch p_4, L durch L' und γ durch ϱ ersetzt ist. Demnach liesse sich leicht eine gemeinschaftliche Lösung der beiden in 1. und 2. behandelten Aufgaben formuliren. Es scheint indessen nützlicher auf den Unterschied aufmerksam zu machen, der in

hygienischer Beziehung zwischen beiden Fällen bestehen kann.

Während der Bewohner eines geheizten Zimmers durch ein oberhalb liegendes, welches die Temperatur der freien Atmosphäre (oder eine davon wenig verschiedene Temperatur) hat, nur insofern geschädigt werden kann, als dasselbe den Luftwechsel des geheizten Zimmers etwas vermindert, kann ein kaltes Gemach, welches unterhalb eines geheizten liegt, dem Bewohner dieses Zimmers überdies dadurch nachtheilig werden, dass die gesammte (möglicherweise nicht unbeträchtliche) Luftmenge, welche aus dem kalten Zimmer abzieht, durch den Fussboden in das geheizte eindringt. Enthält das kalte Zimmer eine Ursache der Luftverschlechterung, so hat der darüber Wohnende, der sein Zimmer heizt und dadurch dem unteren Zimmer eine namhafte Ventilation verschafft, die Wirkung jener Ursache zu erwarten. In einem solchen Falle dürfte es für den oben Wohnenden rathsam sein, die Zwischenräume zwischen den Diehlen, welche den grössten Theil des unzuträglichen Luftwechsels vermitteln, luftdicht zu schliessen und sich behufs der Luftzufuhr eines besonderen mit der freien Luft communicirenden Kanals zu bedienen. Ein solcher Kanal wird am besten innerhalb der horizontalen Zwischenwand so angebracht, dass er einerseits in's Freie, andererseits in den Mantel des Ofens mündet.

4) Auf die Lösung des in Nro 2 behandelten Problems lassen sich gute und einfache Methoden gründen, das Lüftungsvermögen eines Zimmers und seiner Begrenzungen zu bestimmen. Diese Methoden sind in allen Fällen anwendbar, wo sich über dem Versuchszimmer ein anderes von gleicher oder grösserer Bodenfläche befindet, welches geheizt werden kann.

a) Während bei Windstille das obere Zimmer auf eine möglichst hohe Temperatur gebracht wird, sucht man dem-unteren durch Oeffnen aller Fenster und Thüren die Temperatur der äusseren Luft zu verschaffen und durch Oeffnen der Fenster und Thüren in etwa seitlich angrenzenden Lokalen eine freie Umgebung herzustellen.

Ist die Temperatur des oberen Zimmers nahe constant und die des unteren der Temperatur der äusseren Luft gleich geworden, so schliesst man im unteren Zimmer alle Fenster, Thüren und sonst vorhandenen nicht capillaren Oeffnungen (insbesondere die Ofen-Zuglöcher) und misst nun nach v. Pettenkofers Methode den gesammten Luftwechsel (W) = a des unteren Zimmers.

Zugleich beobachtet man mittelst des im kalten Zimmer aufgestellten Differenzial-Manometers an irgend einer Stelle der vertikalen Wand den Ueberdruck (γ) der äusseren Luft über die innere und an einem durch die Zimmerdecke getriebenen eisernen Gasrohr den Ueberdruck

$$p_4 + \varrho - \gamma = b$$

der inneren Luft über die warme Luft, die sich am Boden des oberen Zimmers befindet. Diese Beobachtungen müssen während der Dauer des Versuchs von Zeit zu Zeit wiederholt werden. Es geschieht dieses sehr einfach, indem man sowohl von dem inneren als von dem äusseren Niveau des Manometers einen kurzen Schlauch ableitet und diesen von Zeit zu Zeit mittelst eines Glasrohrs mit einem der beiden Schläuche zusammensteckt, welche nach den eisernen Rohrstücken führen.

Da

$$b\, l_2 = a$$

so ergibt sich aus diesen Beobachtungen sofort l_2, das Lüftungsvermögen der Decke.

Da ferner auch

$$\gamma (L - l_2) = a$$

und a, γ, l_2 bekannt sind, so erhält man L, das gesammte

Lüftungsvermögen des Zimmers. Es ist jetzt noch übrig, die Grössen l_0 und l_1, deren Summe bekannt ($= L - l_2$) ist, von einander zu trennen. Dieses gelingt durch Bestimmung der neutralen Zone des Zimmers, welche in der schon früher (S. 438 u. 439) beschriebenen Weise durchgeführt werden kann.

Man misst nämlich zu einer Zeit, wo das untere Zimmer geheizt und in vollständig freier Umgebung ist (das obere Zimmer ist nicht geheizt, und seine Fenster und Thüren sind offen), sowohl den am Boden bestehenden Ueberdruck (p_0), den die äussere Luft über die innere besitzt, als auch den an der Decke vorhandenen Ueberdruck (p_2) der inneren Luft über die äussere. Dadurch erhält man die linke Seite der Gleichung

$$\frac{p_0}{p_0 + p_2} = \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L},$$

woraus die Unbekannte l_1 gefunden wird. Endlich ist $l_0 = L - l_2 - l_1$.

b) Das folgende Verfahren bietet den grossen Vortheil, dass der Versuch in wenigen Minuten vollendet und auf seinen Fehler leicht controlirt werden kann.

Ist das Versuchszimmer und dessen Umgebung wie vorhin vorbereitet und das obere geheizt, so misst man die Ueberdrücke $b = (p_4 + \varrho - \delta)$ und γ, wodurch die Gleichung

$$b\, l_2 = \gamma\, (L - l_2)$$

erhalten wird, in welcher l_2 und L unbekannt sind.

Nun wird ein irgendwo in der vertikalen Begrenzung oder im Boden des unteren Zimmers angebrachter Kanal geöffnet (dazu können die kleinen Schalter gut benützt werden, welche eine einzige Fensterscheibe enthalten), und es werden sowohl die in der Zeiteinheit durch den Kanal strömende Luftmenge (m) als auch die beiden Ueberdrücke b' γ', welche beziehungsweise an der Decke und in der vertikalen Begrenzung stattfinden, gemessen, wobei $b' > b$ und $\gamma' < \gamma$ ausfallen wird. Dadurch erhält man die zweite Gleichung

$$b' l_2 = \gamma' (L - l_2) + m.$$

Multiplicirt man die erste Gleichung mit γ', die zweite mit γ und subtrahirt, so erhält man

$$l_2 b' \gamma - l_2 b \gamma' = m \gamma$$

oder

$$l_2 = \frac{m \gamma}{\gamma b' - \gamma' b},$$

und

$$L = \frac{m (\gamma + b)}{\gamma b' - \gamma' b}.$$

Das Uebrige kann dann durch Bestimmung der neutralen Zone des unteren Zimmers gefunden werden wie vorhin.

Man erreicht denselben Zweck, wenn man einen durch die Decke führenden Kanal öffnet, wodurch γ gesteigert wird und b abnimmt. Doch dürften solche Kanäle seltener zu Gebote stehen.*)

c) Mit den unter b) beschriebenen Versuchen lässt sich leicht die Bestimmung der Durchlässigkeiten des oberen Zimmers verbinden, da die Durchlässigkeit l_2 seines Fussbodens schon bekannt ist.

Zu diesem Zweck misst man die Temperatur (T') des oberen Zimmers zu der Zeit, wo unten die Ueberdrücke b und γ beobachtet werden, und erhält dann $p' = p_4 + p_6$ aus der Formel

---

*) In einem Anhang sind Versuche, welche nach einer ähnlichen Methode durchgeführt wurden, ausführlich beschrieben.

$$p' = H' \, 1{,}293 \, \frac{B}{760} \cdot \frac{T' - t}{270 + T' + t}$$

der berechnete Werth von p' wird in die Gleichung

$$\gamma = p' \, \frac{l_2 \, (L' - l_2 - \frac{1}{2} \, l_5)}{L \, L' - l_2^2}$$

eingesetzt, in welcher nur L' und l_5 unbekannt sind.

Die unter normalen Umständen (bei allseitig freier Umgebung des oberen Zimmers) ausgeführte Bestimmung der neutralen Zone gibt einen Werth (ζ) für die linke Seite der Gleichung

$$\frac{p_6}{p_4 + p_6} = \frac{l_2 + \frac{1}{2} \, l_5}{L'}$$

in welcher dieselben beiden Unbekannten L' und l_5 vorkommen. Aus

$$\gamma = p' \, \frac{l_2 \, (L' - l_2 - \frac{1}{2} \, l_5)}{L \, L' - l_2^2}$$

und

$$\zeta = \frac{l_2 + \frac{1}{2} \, l_5}{L'}$$

folgt

$$L' = \frac{l_2^2 \, \gamma}{L \gamma - (1 - \zeta) \, p' l_2},$$

$$l_5 = 2 \, (L' \, \zeta - l_2).$$

Endlich ist:

$$l_6 = L' - (l_2 + l_5).$$

II.

1) Haben zwei Zimmer, von welchen das eine über dem anderen liegt, höhere Temperaturen als die freie Luft, welche die ganze Combination umgibt, so lässt sich der Luftwechsel dieser Zimmer ebenfalls nach den im vorigen Abschnitt angewandten Principien bestimmen.

Die Temperatur des oberen Zimmers sei constant T', die des unteren T, beide grösser als die constante Temperatur t der Umgebung.

Die Lüftungsvermögen der beiden Zimmer sollen wie bisher mit L und L', die der einzelnen Begrenzungen in ihrer Reihenfolge von unten nach oben mit den Buchstaben l_0, l_1, l_2, l_5, l_6 bezeichnet werden, wobei die geraden Indices sich auf die 3 horizontalen, die ungeraden auf die 2 vertikalen Begrenzungen beziehen. Die Ueberdrücke, welche am Boden und an der Decke der beiden Zimmer unter normalen Umständen stattfinden, werden durch p_0, p_2, p_4, p_6 ausgedrückt, ferner $p_0 + p_2 = p$; $p_4 + p_6 = p'$ gesetzt, so dass $H \frac{p_0}{p} = h$; $H' \frac{p_4}{p'} = h'$ die normalen Höhen der beiden neutralen Zonen über dem Fussboden bezeichnen, und die Gleichungen

$$\left.\begin{aligned} \frac{p_0}{p} &= \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L} \\ \frac{p_4}{p'} &= \frac{l_6 + \frac{1}{2} l_5}{L'} \end{aligned}\right\} \ldots \text{n)}$$

Geltung haben.

Zu beiden Seiten der Trennungsfläche (l_2) beider Zimmer bestehen, wenn man durch Aufeinanderstellen der

Zimmer die normalen Umstände eben erst beseitigt denkt, Ueberdrücke p_2 und p_4, von welchen p_2 der im unteren Zimmer bestehende Ueberdruck der inneren Luft über die äussere, p_4 der im Niveau des Fussbodens des oberen Zimmers bestehende Ueberdruck der äusseren Luft über die innere ist.

Demnach besitzt (bei Vernachlässigung der Dicke der Zwischenschicht) die Luft unterhalb der Trennungsfläche zunächst den Ueberdruck $p_2 + p_4$ über die oberhalb derselben Fläche befindliche Luft, und es strömt nun in das obere Zimmer mehr Luft ein, als vorher, wo dasselbe in freier Umgebung war. Die nächste Folge ist, dass dieses Zimmer einem neuen Beharrungszustande zustrebt, in welchem auch mehr Luft ausströmt. Dieses kann aber nur dadurch geschehen, dass der Druck p_6 zunimmt. Die Zunahme von p_6 (um ϱ) hat eine Abnahme von p_4 um denselben Betrag zur Folge, weil die Summe $p' = p_4 + p_6$, welche nur von der Zimmerhöhe und den Temperaturen abhängt, constant bleibt. Somit geht p_6 in $p_6 + \varrho$, und p_4 in $p_4 - \varrho$ über, und die neutrale Zone, die vorher in der Höhe $h' = \frac{p_4}{p'} H'$ lag, rückt nun abwärts, der Trennungsfläche näher, in die Höhe $\frac{p_4 - \varrho}{p'} H'$.

Im unteren Zimmer muss, weil nun durch die Decke mehr Luft als vorhin ausströmt, auch die einströmende Menge wachsen. Es wächst demnach p_0 (um γ), und um ebensoviel muss p_2 abnehmen. Die neutrale Zone rückt aufwärts der Trennungsfläche näher und liegt schliesslich in der Höhe

$$\frac{p_0 + \gamma}{p} H.$$

Die Grössen ϱ und γ können bestimmt werden aus den beiden Gleichungen des Luftwechsels

$$l_0 (p_0 + \gamma) + \frac{1}{2} l_1 \frac{(p_0 + \gamma)^2}{p} = \frac{1}{2} l_1 \frac{(p_2 - \gamma)^2}{p} + l_2 \Big[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\Big] \ldots \quad (5$$

$$l_2 \Big[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\Big] + \frac{1}{2} l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{p'} = \frac{1}{2} l_5 \frac{(p_6 + \varrho)^2}{p'} + l_6 (p_6 + \varrho) \ldots \quad (6,$$

welche man zu diesem Zweck mit Hilfe von $p_0 + p_2 = p$, $p_4 + p_6 = p'$ in die einfacheren Formen

$$(p_0 + \gamma) l_0 + \frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2 + 2\gamma) = l_2 \Big[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\Big] \ldots \quad (5^a$$

$$l_2 \Big[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\Big] + \frac{1}{2} l_5 (p_4 - p_6 - 2\varrho) = l_6 (p_6 + \varrho) \ldots \quad (6^a$$

überführen kann.

Da auch gilt

$$\left.\begin{aligned} l_0 p_0 + \frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2) &= l_2 p_2 \\ l_2 p_4 + \frac{1}{2} l_5 (p_4 - p_6) &= l_6 p_6 \end{aligned}\right\} \text{Gleichungen des normalen Luftwechsels,}$$

so erhält man noch einfacher

$$l_0 \gamma + l_1 \gamma = l_2 \Big(p_4 - (\gamma + \varrho)\Big)$$

$$l_2 \Big(p_2 - (\gamma + \varrho)\Big) - l_5 \varrho = l_6 \varrho$$

und hieraus

$$L\gamma + l_2\varrho = l_2 p_4 \ldots \qquad (5^b$$

$$l_2\gamma + L'\varrho = l_2 p_2 \ldots \qquad (6^b,$$

wodurch

$$\left.\begin{aligned} \varrho &= \frac{l_2 (L p_2 - l_2 p_4)}{L' L - l_2^2} \\ \gamma &= \frac{l_2 (L' p_4 - l_2 p_2)}{L' L - l_2^2} \end{aligned}\right\} \ldots \text{F. } 7$$

wird.

Für die **B e r e c h n u n g d e s L u f t w e c h s e l s b e i - d e r Z i m m e r** dürften die Formeln

$$W' = l_2 \left[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\right] + \frac{1}{2} l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{p'} \ldots \text{F. } 8$$

(Einströmung in das obere Zimmer)

$$W = l_2 \left[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho)\right] + \frac{1}{2} l_1 \frac{(p_2 - \gamma)^2}{p} \ldots \text{F. } 9$$

(Ausströmung aus dem unteren Zimmer)

am bequemsten sein.

Ausserdem gilt auch

$$W' = l_6 (p_6 + \varrho) + l_5 \frac{(p_6 + \varrho)^2}{2 p'} \ldots \text{F. } 8^a$$

(Ausströmung aus dem oberen Zimmer)

$$W = l_0 (p_0 + \gamma) + l_1 \frac{(p_0 + \gamma)^2}{2 p} \ldots \text{F. } 9^a$$

(Einströmung in das untere Zimmer)

In diesen Formeln stellen die ersten Glieder die Luftmengen dar, welche durch die horizontalen Wände gehen, die zweiten Glieder geben, was durch den jedesmal angrenzenden Theil der vertikalen Begrenzung strömt.

Die Discontinuität in der Richtung der Wände verursacht indessen hinsichtlich der Anwendung dieser Formeln eine Ausnahme. Ist $p_2 \, L < l_2 \, p_4$, was auch bei wenig verschiedenen Durchlässigkeiten beider Zimmer dann vorkommen kann, wenn die Temperatur des oberen Zimmers viel höher ist als die des unteren, so ist $p_2 - \gamma$ negativ $p_0 + \gamma > p$, und somit die neutrale Zone, welcher das zweite Glied des Luftwechsels seine Existenz verdankt, aus dem unteren Zimmer verschwunden. Es betheiligt sich in Folge des übermässigen Ansaugens, welches von Seiten des oberen Zimmers erfolgt, ausser dem Boden des unteren Zimmers auch noch dessen g e s a m m t e vertikale Begrenzung am Einlassen der Luft, die durch die Decke allein nach dem oberen Zimmer abströmt. Somit verschwindet in diesem Fall das zweite Glied aus der Formel W des unteren Luftwechsels, und dieser ist auf das erste Glied

$$l_2 \left[p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho) \right],$$

welches die durch die Decke nach oben strömende Luftmenge gibt, beschränkt.

Analoges tritt im o b e r e n Z i m m e r ein, wenn

$$p_4 \, L' < l_2 \, p_2 ,$$

also bei wenig verschiedenen Durchlässigkeiten die Temperatur des unteren Zimmers bedeutend höher ist. Die Decke und die ganze vertikale Wand des oberen Zimmers lassen dann Luft hinaus, während die Einströmung durch den Fussboden allein stattfindet. Die Formel W′ des Luftwechsels reducirt sich dann auf das erste Glied

$$l_2 \left(p_2 + p_4 - (\gamma + \varrho) \right).$$

Der B e w e i s für die Richtigkeit der eben aufgestellten Behauptungen wird dadurch geführt, dass man die Giltigkeit der aus den Formeln (F. 7) berechneten Werthe von

γ und ϱ auch für den Fall nachweist, dass die neutrale Zone, deren Existenz bei Aufstellung der Gleichungen (5 und (6 vorausgesetzt wurde, in einem der beiden Zimmer nicht mehr vorhanden ist.

Fehlt die neutrale Zone im unteren Zimmer, so erhält man die durch dessen vertikale Begrenzung einströmende Luftmenge, wenn man l_1 mit dem arithmetischen Mittel der am unteren und oberen Ende bestehenden Ueberdrücke (der äusseren Luft über die innere) multiplizirt. Demnach wird die Gleichung des Luftwechsels im unteren Zimmer

$$l_0 (p_0 + \gamma') + l_1 \frac{(p_0 + \gamma') + (\gamma' - p_2)}{2} =$$

$$l_2 \Big(p_2 + p_4 - (\gamma' + \varrho')\Big)$$

und im oberen

$$l_2 \Big(p_2 + p_4 - (\gamma' + \varrho')\Big) + \frac{1}{2} l_5 \frac{(p_4 - \varrho')^2}{p'} =$$

$$\frac{1}{2} l_5 \frac{(p_6 + \varrho')^2}{p} + l_6 (p_6 + \varrho')$$

Da die erste dieser beiden Gleichungen mit (5^a, die zweite mit (6 identisch wird, wenn man γ', ϱ' durch γ, ϱ ersetzt, so ergeben sich für die hier angenommenen Ergänzungen γ', ϱ' die oben für γ und ϱ abgeleiteten Werthe.

Stellt man die Gleichungen des Luftwechsels für den Fall auf, dass im oberen Zimmer die neutrale Zone fehlt, so kommt man auf die Gleichungen (5 und (6^a, also ebenfalls auf die Formeln (F. 7), was zu beweisen war.

2. Diskussion der Formeln des Luftwechsels.

Die Ungleichungen

$$L\, p_2 < l_2\, p_4$$
$$l_2\, p_2 > L'\, p_4$$

sind auch entscheidend für Beantwortung der Frage, ob eines der beiden Zimmer bei der angenommenen gegenseitigen Lage grösseren oder kleineren Luftwechsel hat, als bei vollständig freier Umgebung.

Vergleicht man nämlich die oben mit (F. 8ᵃ) und (F. 9ᵃ) bezeichneten Formeln mit denen des vollständig freien Luftwechsels

$$l_0\, p_0 + \frac{1}{2}\, l_1\, \frac{p_0^{\,2}}{p},$$

$$l_6\, p_6 + \frac{1}{2}\, l_5\, \frac{p_6^{\,2}}{p'},$$

so folgt, dass der modificirte Luftwechsel dem freien gegenüber gesteigert oder vermindert ist, je nachdem die Druckänderungen ϱ, γ positiv oder negativ ausfallen.

Bei einer Untersuchung über die Vorzeichen von ϱ und γ ist zu beachten, dass die Grössen L, L' nur positiv sein können, und dass auch der Nenner $L\,L' - l_2^{\,2}$ immer positiv ist, weil $l_2^{\,2}$ nur e i n Glied der Entwickelung von $L\,L'$ bildet, welche aus lauter positiven Gliedern besteht. Was endlich die Grössen p_2 und p_4 betrifft, so stellen sie diejenigen Ueberdrücke dar, welche u n t e r n o r m a l e n U m s t ä n d e n in dem unteren Zimmer an der Decke, im oberen am Fussboden bestehen und haben daher, wenn sie positiv sind, insofern entgegengesetzten Sinn, als p_2 einen Ueberdruck der inneren Luft über die äussere, p_4 einen Ueberdruck der äusseren Luft über die innere bezeichnet. Diese Grössen sind von den Temperaturen, Dimensionen und Durchlässigkeiten abhängig, wie in der ersten Abhandlung (S. 443) nachgewiesen ist, und so lange beide Zimmer höhere Temperatur als ihre Umgebung haben, immer positiv.

Somit ist ϱ positiv und der Luftwechsel des oberen Zimmers gesteigert, so lange

$$L\,p_2 > l_2\,p_4;$$

hingegen ist ϱ negativ und der Luftwechsel oben vermindert, wenn

$$L\,p_2 < l_2\,p_4.$$

Da andererseits γ negativ, Null oder positiv wird, je nachdem

$$L'\,p_4 \lesseqqgtr l_2\,p_2,$$

so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers, je nachdem eine dieser Beziehungen stattfindet, kleiner, ebenso gross oder grösser als bei vollständig freier Umgebung.

Man kann demnach (mit Rücksicht auf S. 479) die Antwort auf die gestellte Frage auch in folgender Form geben: Liegt ein Zimmer so über einem andern, dass die Decke des einen zugleich den Fussboden des andern bildet, und haben beide Zimmer höhere Temperatur als die freie Umgebung, so ist der Luftwechsel in einem dieser Zimmer grösser, eben so gross oder kleiner als bei allseitig freier Umgebung desselben, je nachdem im andern Zimmer die neutrale Zone innerhalb der vertikalen Wand, an deren Grenze, oder ausserhalb derselben liegt.

Ferner erkennt man, dass nie in beiden Zimmern zugleich der Luftwechsel dem freien gleich oder geringer als dieser sein kann. Denn aus

$$L\,p_2 \stackrel{=}{<} l_2\,p_4$$

folgt

$$L'\,p_4 > l_2\,p_2,$$

und aus

$$L'\,p_4 \stackrel{=}{<} l_2\,p_2$$

folgt

$$L\,p_2 > l_2\,p_4.$$

Wohl aber kann der Luftwechsel in beiden Zimmern zugleich gesteigert sein.

Stellt man alle Fälle zusammen, so erhält man folgende Uebersicht:

Liegt p_2 zwischen $\frac{l_2}{L} p_4$ und $\frac{L'}{l_2} p_4$, so ist der Luftwechsel in beiden Zimmern gesteigert. Bleibt p_2 unter dem Werthe $\frac{l_2}{L} p_4$, so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers gesteigert, der des oberen vermindert. Geht p_2 über $\frac{L'}{l_2} p_4$ hinaus, so ist der Luftwechsel des oberen Zimmers gesteigert, der des unteren vermindert.

Aus den Gleichungen

$$p_2 = \frac{l_2}{L} p_4$$

$$p_2 = \frac{L'}{l_2} p_4$$

kann man die beiden Grenztemperaturen berechnen, bei welchen ein Wechsel in dem allgemeinen Grössenverhältniss des freien zu dem durch gegenseitige Beeinflussung der Zimmer veränderten Luftwechsel eintritt.

Diese Gleichungen lassen sich mit Hilfe der Gleichungen (n) umformen in

$$p = p' \frac{l_2 \left(l_6 + \frac{1}{2} l_5\right)}{L' \left(l_0 + \frac{1}{2} l_1\right)}$$

$$p = p' \frac{L \left(l_6 + \frac{1}{2} l_5\right)}{l_2 \left(l_0 + \frac{1}{2} l_1\right)}$$

und gehen durch Substitution für p und p′ über in

$$H \frac{T - t}{270 + T + t} = H' \frac{T' - t}{270 + T' + t} \cdot \frac{l_2 \left(l_6 + \frac{1}{2} l_5\right)}{L' \left(l_0 + \frac{1}{2} l_1\right)}$$

$$H \frac{T - t}{270 + T + t} = H' \frac{T' - t}{270 + T' + t} \cdot \frac{L \left(l_6 + \frac{1}{2} l_5\right)}{l_2 \left(l_0 + \frac{1}{2} l_1\right)}$$

Nimmt man hier T′ als gegeben an, so findet man zwei Werthe für T ($T_0 < \Theta$), welche das Temperaturintervall begrenzen, innerhalb dessen der Luftwechsel beider Zimmer gesteigert ist. Ist $T < T_0$, so ist der Luftwechsel des oberen Zimmers vermindert, ist $T > \Theta$, so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers dem freien gegenüber vermindert.

Umgekehrt kann man T als gegeben betrachten und die entsprechenden Grenzwerthe von T′ ($T'_0 < \Theta'$) berechnen.

Beispiel. Nimmt man den früheren Angaben gemäss $l_6 = l_2 = l_0$, $l_5 = l_1$, $l_2 = 5 . 35$, $l_1 = 24 . 3{,}6$, $H = H' = 3{,}6$, $t = 0$, T′ constant und gleich 20° C, so muss, damit der Luftwechsel des oberen Zimmers grösser wird als bei freier Umgebung, die Temperatur des unteren Zimmers 7,7° C überschreiten.

Das untere Zimmer hat, während seine Temperatur von 0° C an wächst, gesteigerten Luftwechsel, bis dieselbe 56,1° überschreitet. Von da an bildet das obere Zimmer ein Hinderniss für den Luftwechsel des unteren.

Wenn die Temperatur des oberen Zimmers constant 20° ist und die des unteren zwischen 7,7° und 56,1° liegt, haben beide Zimmer grösseren Luftwechsel als bei freier Umgebung.

Ist z. B. die Temperatur des unteren Zimmers ebenfalls 20°, so berechnet sich der Luftwechsel in jedem der beiden Zimmer zu 41,8 C^m, während derselbe nur 31,5 C^m betrüge, wenn jedes der beiden Zimmer durchaus von freier Luft umgeben wäre.

Vom hygienischen Standpunkt ist zu diesen Resultaten ähnliches su bemerken wie in (I). Sind beide Zimmer bewohnt, so zieht nur das untere wirklichen Nutzen aus der Steigerung des Luftwechsels, welche durch Heizen des oberen bewirkt wird. Das obere hingegen verliert bei derjenigen Steigerung seines Luftwechsels, welche durch Heizen des unteren Zimmers hervorgebracht wird, einen Theil der vortheilhaften Strömung, welche ihm durch den unteren Theil der vertikalen Wände Luft aus dem Freien zuführte, während der Strom verbrauchter Luft, der durch den Fussboden aus dem unteren Zimmer eindringt, um mehr als jenen Verlust anwächst. Es sind somit auch an dieser Stelle, also für den im Winter bei weitem häufigsten Fall, dem oben Wohnenden die in (I) angegebenen Massregeln zu empfehlen.

Zusammenstellung

der Formeln, welche zur Berechnung des Luftwechsels zweier Zimmer dienen, deren eines über dem anderen liegt.

1. Oberes Zimmer.

a) Wenn

$$p_2 < \frac{L'}{l_2} p_4$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{2 p'}.$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_5 \frac{(p_6 + \varrho)^2}{2\,p'}.$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_6\,(p_6 + \varrho).$$

b) Wenn

$$p_2 > \frac{L'}{l_2}\,p_4,$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_2\left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

Null.

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$\frac{1}{2}\,l_5\,(p_6 - p_4 + 2\,\varrho).$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_6\,(p_6 + \varrho).$$

2. Unteres Zimmer.

a) Wenn

$$p_2 > \frac{l_2}{L}\,p_4$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_0\,(p_0 + \gamma).$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_1 \frac{(p_0 + \gamma)^2}{2\,p}.$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_1 \frac{(p_2 - \gamma)^2}{2\,p}.$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_2\left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

b) Wenn

$$p_2 < \frac{l_2}{L} p_4,$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_0 (p_0 + \gamma).$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$\frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2 + 2\gamma).$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

Null.

Ausströmung durch die Decke:

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Hiezu kommt:

$$\varrho = \frac{l_2 (L p_2 - l_2 p_4)}{L L' - l_2^2},$$

$$\gamma = \frac{l_2 (L' p_4 - l_2 p_2}{L L' - l_2^2};$$

$$p_2 = p \frac{l_0 + \frac{1}{2} l_1}{L}; \quad p_0 = p \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L}$$

$$p_4 = p' \frac{l_6 + \frac{1}{2} l_5}{L'}; \quad p_6 = p' \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_5}{L'}$$

$$p = H \,.\, 1{,}293 \frac{B}{760} \cdot \frac{T - t}{270 + T + t}$$

$$p' = H' \,.\, 1{,}293 \frac{B}{760} \cdot \frac{T' - t}{270 + T' + t}.$$

III.

Verallgemeinerung der Resultate.

Es sollen nun die Bedingungen angegeben werden, unter denen die im zweiten Theil (II) erhaltenen Formeln für die übrigen Fälle gelten, welche durch Abänderung der Beziehungen zwischen den 3 Temperaturen T', T, t combinirt werden können.

1) Die früher (in I) behandelten Aufgaben, wo eines der beiden Zimmer die Temperatur der Umgebung hat, das andere aber eine höhere Temperatur, sind unbedingt besondere Fälle von (II). Je nachdem das untere oder das obere Zimmer das kältere ist, wird $T = t$ oder $T' = t$, und da im ersten Fall, wegen

$$p = 0, \; p_2 = 0,$$
$$p_2 < \frac{l_2}{L} p_4 \text{ und } p_2 < \frac{L'}{l_2} p_4 \text{ ist;}$$

im zweiten Fall, wegen

$$p' = 0, \; p_4 = 0,$$
$$p_2 > \frac{L'}{l_2} p_4 \text{ und } p_2 > \frac{l_2}{L} p_4,$$

so gilt für das Zimmer, welches die Temperatur der Umgebung hat, der in der Zusammenstellung (S. 485 ff. unter b) verzeichnete, für das wärmere der unter a) aufgeführte Luftwechsel.

2) Sind beide Zimmer kälter als die Umgebung, so sind ebenfalls sämmtliche Formeln unbedingt zulässig. Da $T < t$ und $T' < t$, werden sämmtliche Ueberdrücke negativ, und auch die Veränderungen derselben (ϱ, γ) wechseln ihr Vorzeichen. Die Luftwechsel erscheinen mit negativem Vorzeichen, was auf den thatsächlich eingetretenen Wechsel in der Richtung der Luftströmungen hinweist.

In den Ungleichungen, welche zwischen den Formeln des Luftwechsels entscheiden, sind die absoluten Werthe der Ueberdrücke p_2 und p_4 anzuwenden.

3) Hat eines der beiden Zimmer die Temperatur der Umgebung, während das andere

kälter ist, so sind ebenfalls sämmtliche Formeln unbedingt anwendbar, und zwar gelten aus analogen Gründen wie in 1) für das Zimmer, welches die Temperatur der Umgebung hat, die unter b) vorgetragenen Formeln, hingegen für das kältere die unter a) eingesetzten.

4) Zuletzt ist noch denkbar, dass das eine Zimmer kälter, das andere wärmer als die Umgebung ist. Dieser Fall soll besonders erklärt werden.

Ist das obere Zimmer wärmer, so ist zu beiden Seiten der horizontalen Trennungsschicht der Luftdruck geringer als im gleichen Niveau der Umgebung, und es ist zunächst sowohl für die Richtung als für die Menge der durch die Zwischenschicht strömenden Luft die Differenz der beiden Minderdrücke (p_2 und p_4) massgebend. Ist (absolut) $p_2 > p_4$, so wirkt der geringere Minderdruck (p_4), dem grösseren Minderdruck (p_2) gegenüber als Ueberdruck, und es geht die Luft durch die Decke von oben nach unten; hingegen strömt sie von unten nach oben, wenn $p_2 < p_4$ ist.

Da nun bei vollständig freier Umgebung beider Zimmer die Luft sowohl durch den Boden in das obere Zimmer als durch die Decke in das untere einströmen würde, beides zugleich aber bei der Combination der Zimmer unmöglich ist, so ist in einem der beiden Zimmer der Luftwechsel abnorm. Die neutrale Zone scheidet hier die Flächen nicht mehr in einlassende und hinauslassende, sondern es liegen auf derselben Seite der neutralen Zone Flächen, welche sich in entgegengesetztem Sinn am Luftwechsel betheiligen.

Analoge Erwägungen führen zu dem allgemeinen Resultat, dass der stationäre Luftwechsel in demjenigen der beiden Zimmer dem freien ähnlich ist, in welchem, zunächst der Zwischenschicht, der grössere Ueberdruck oder Minderdruck besteht.

Also in dem oberen, wenn dem absoluten Zahlenwerthe nach

$$p_4 - \varrho > p_2 - \gamma,$$

und in dem unteren, wenn umgekehrt

$$p_2 - \gamma > p_4 - \varrho.$$

Dieser dem normalen ähnliche Luftwechsel wird durch die in der Zusammenstellung (S. 485 ff.) unter a) gegebenen Formeln ausgedrückt. Denn da in diesem Fall der Luftstrom durch die Zwischenschicht immer schwächer ist als bei freier Umgebung, so hat im oberen Zimmer ($-\varrho$) mit p_4, im unteren ($-\gamma$) mit p_2 gleiches Vorzeichen, und es kann nicht vorkommen, dass $p_4 - \varrho$ oder $p_2 - \gamma$ Null oder negativ werden. Auch bleibt nothwendig $p_4 - \varrho < p'$ und $p_2 - \gamma < p$, da ausserdem nur eine Art der Strömung im Zimmer stattfinden würde.

Auch der abnorme Luftwechsel des anderen Zimmers ist durch die Formeln der Zusammenstellung (S. 485 ff.) gegeben, und zwar durch die unter a) vorgetragenen, wenn (absolut)

$$p_4 - \varrho < p',$$

beziehungsweise

$$p_2 - \gamma < p;$$

hingegen durch die Formeln b), wenn (absolut)

$$p_4 - \varrho > p',$$

beziehungsweise

$$p_2 - \gamma > p.$$

Man sieht, dass für die Wahl der Formeln die Erwägung, ob der Luftwechsel normal oder abnorm ist, nicht entscheidet; sondern dass man sich auf Beachtung der zuletzt angeschriebenen vier Ungleichungen beschränken kann.

Bei allen Uebertragungen der Formeln (Zusammenstellung S. 485 ff.) auf Fälle, für welche sie nicht direkt abgeleitet sind, ist zu beachten, dass, so oft ein Glied des Luftwechsels negativ ausfällt, die Art der Strömung der in der Ueberschrift angegebenen entgegengesetzt ist, also Einströmung durch Ausströmung und umgekehrt ersetzt werden muss.

Beispiel. Gelten für die beiden Zimmer die den früheren Rechnungen zu Grund gelegten Annahmen:

$$l_0 = l_2 = l_6 = 175, \; l_1 = l_5 = 86{,}4, \; H = H' = 3{,}6$$
$$T' = 20^0, \; t = 0^0, \text{ aber } T = -10^0;$$

so ist (der Barometerstand = 760^{mm} vorausgesetzt)

$$p' = 0{,}32, \; p_4 = p_6 = 0{,}16$$
$$p = -0{,}176, \; p_0 = p_2 = -0{,}088$$
$$\varrho = -0{,}073$$
$$\gamma = +0{,}093.$$

Da dem absoluten Zahlenwerth nach

$$p_2 - \gamma < p_4 - \varrho,$$

so geht der Strom durch die Decke aufwärts, und der dem freien ähnliche Luftwechsel des oberen Zimmers kann nach der Formel 1) a

$$W' = l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{2\,p'} + l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right]$$

berechnet werden. Man findet 16,3 C^m für diese Einströmung, also bedeutend weniger als bei freier Umgebung, wo sie 31,5 C^m betragen würde.

Sucht man den Luftwechsel des unteren Zimmers, so erkennt man zunächst, dass (absolut)

$$p_2 - \gamma > p$$

(nämlich 0,181 > 0,176), und mithin zur Berechnung des Luftwechsels die Formeln 2) b dienen.

Man erhält

$$l_0 (p_0 + \gamma) = 175 \,.\, 0{,}005$$

oder 0,875 C^m für die Einströmung durch den Boden,

$$\frac{1}{2}\, l_1 (p_0 - p_2 + 2\,\gamma) = 86{,}4 \,.\, 0{,}093$$

oder 8,035 C^m für die Einströmung durch die vertikalen Wände.

Diese 8,9 C^m strömen durch die Decke aus, was man durch Berechnung der Formel

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right] = 175 \cdot 0{,}052,$$

in den ganzen Cubikmetern übereinstimmend, ebenfalls findet.

Bei freier Umgebung würde der Luftwechsel des unteren Zimmers 17,3 C^m betragen haben.

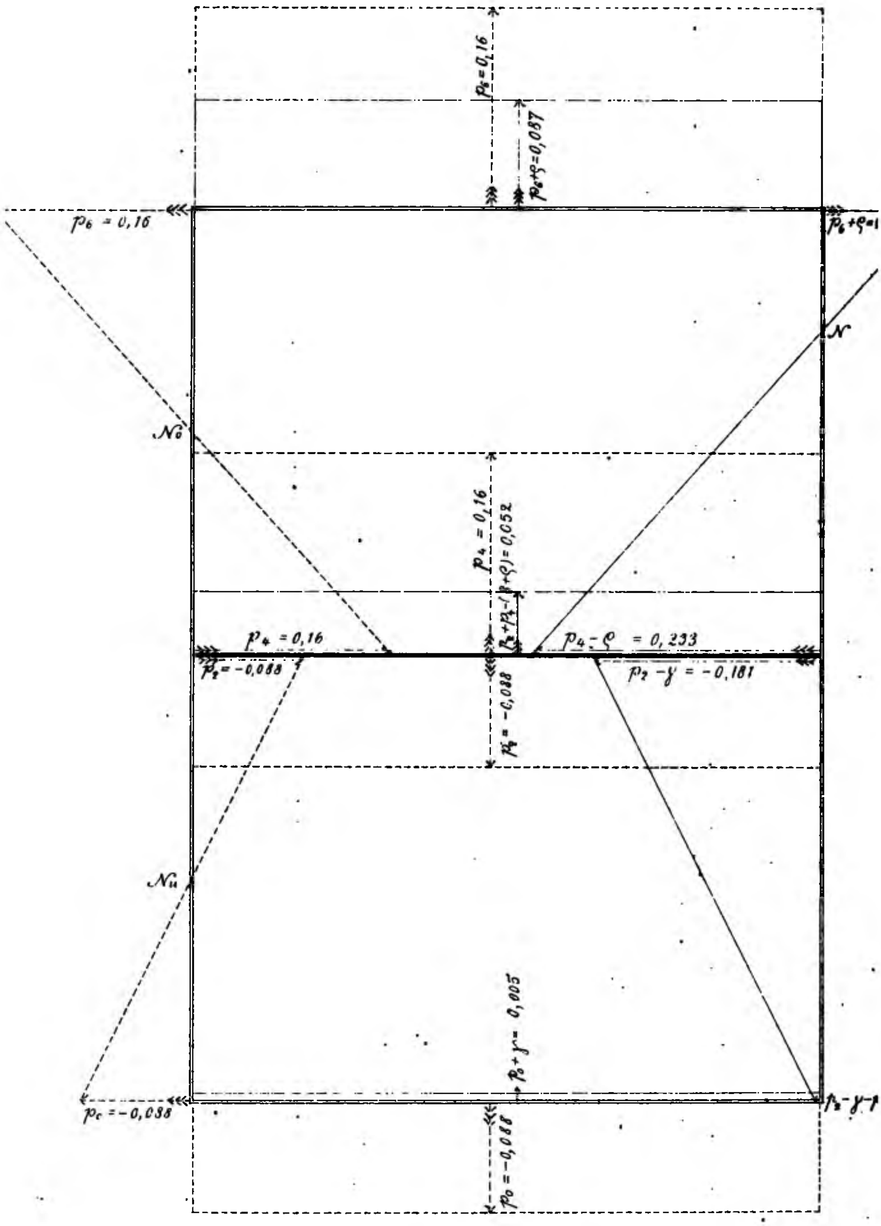
Die starken Veränderungen, welche in dem berechneten Beispiel durch gegenseitige Einwirkung der beiden Zimmer entstehen, machen dasselbe besonders instruktiv.

Die Figur (Nr. 3) gibt eine graphische Darstellung der Druckvertheilung, welche aus den der Rechnung zu Grunde liegenden Angaben folgt. Die Begrenzung der Zimmer ist durch Doppelstriche angegeben. Durch die punktirten Linien sind diejenigen Ueberdrücke begrenzt, welche bei vollständig freier Umgebung in jedem einzelnen Zimmer den Luftwechsel bewirken würden. Die einfach ausgezogenen Linien begrenzen die Ueberdrücke, welche sich entwickelt haben, nachdem die Combination beider Zimmer einen Beharrungszustand erreicht hat.

Im unteren Zimmer fehlt schliesslich die neutrale Zone, welche vorher bei N_u lag, und es strömt sowohl durch die ganze vertikale Begrenzung (unter dem mittleren Ueberdruck $\frac{0{,}181 + 0{,}005}{2}$) als durch den Boden (unter dem Ueberdruck 0,005) Luft ein, während eine gleich grosse Luftmasse (unter dem Ueberdruck 0,052) durch die Decke entweicht.

Im oberen Zimmer lag die neutrale Zone vorher bei N_o und ist schliesslich nach N hinaufgerückt, weil der stark verminderten Boden-Einströmung verminderte Ausströmung entsprechen muss.

Figur 3.



4.. Math. phys. Cl.]

Lith. Anstalt v Gebrüder Obpacher, München.

Somit ist ϱ positiv und der Luftwechsel des oberen Zimmers gesteigert, so lange

$$L\, p_2 > l_2\, p_4\,;$$

hingegen ist ϱ negativ und der Luftwechsel oben vermindert, wenn

$$L\, p_2 < l_2\, p_4.$$

Da andererseits γ negativ, Null oder positiv wird, je nachdem

$$L'\, p_4 \lesseqgtr l_2\, p_2,$$

so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers, je nachdem eine dieser Beziehungen stattfindet, kleiner, ebenso gross oder grösser als bei vollständig freier Umgebung.

Man kann demnach (mit Rücksicht auf S. 479) die Antwort auf die gestellte Frage auch in folgender Form geben: Liegt ein Zimmer so über einem andern, dass die Decke des einen zugleich den Fussboden des andern bildet, und haben beide Zimmer höhere Temperatur als die freie Umgebung, so ist der Luftwechsel in einem dieser Zimmer grösser, eben so gross oder kleiner als bei allseitig freier Umgebung desselben, je nachdem im andern Zimmer die neutrale Zone innerhalb der vertikalen Wand, an deren Grenze, oder ausserhalb derselben liegt.

Ferner erkennt man, dass nie in beiden Zimmern zugleich der Luftwechsel dem freien gleich oder geringer als dieser sein kann. Denn aus

$$L\, p_2 \overline{\overline{<}}\, l_2\, p_4$$

folgt

$$L'\, p_4 > l_2\, p_2,$$

und aus

$$L'\, p_4 \overline{\overline{<}}\, l_2\, p_2$$

folgt

$$L\, p_2 > l_2\, p_4.$$

Wohl aber kann der Luftwechsel in beiden Zimmern zugleich gesteigert sein.

Stellt man alle Fälle zusammen, so erhält man folgende Uebersicht:

Liegt p_2 zwischen $\frac{l_2}{L}\, p_4$ und $\frac{L'}{l_2}\, p_4$, so ist der Luftwechsel in beiden Zimmern gesteigert. Bleibt p_2 unter dem Werthe $\frac{l_2}{L}\, p_4$, so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers gesteigert, der des oberen vermindert. Geht p_2 über $\frac{L'}{l_2}\, p_4$ hinaus, so ist der Luftwechsel des oberen Zimmers gesteigert, der des unteren vermindert.

Aus den Gleichungen

$$p_2 = \frac{l_2}{L}\, p_4$$

$$p_2 = \frac{L'}{l_2}\, p_4$$

kann man die beiden Grenztemperaturen berechnen, bei welchen ein Wechsel in dem allgemeinen Grössenverhältniss des freien zu dem durch gegenseitige Beeinflussung der Zimmer veränderten Luftwechsel eintritt.

Diese Gleichungen lassen sich mit Hilfe der Gleichungen (n) umformen in

$$p = p' \frac{l_2\,(l_6 + \frac{1}{2}\, l_5)}{L'\,(l_0 + \frac{1}{2}\, l_1)}$$

$$p = p' \frac{L\,(l_6 + \frac{1}{2}\, l_5)}{l_2\,(l_0 + \frac{1}{2}\, l_1)}$$

und gehen durch Substitution für p und p′ über in

$$H \frac{T - t}{270 + T + t} = H' \frac{T' - t}{270 + T' + t} \cdot \frac{l_2 (l_6 + \frac{1}{2} l_5)}{L' (l_0 + \frac{1}{2} l_1)}$$

$$H \frac{T - t}{270 + T + t} = H' \frac{T' - t}{270 + T' + t} \cdot \frac{L (l_6 + \frac{1}{2} l_5)}{l_2 (l_0 + \frac{1}{2} l_1)}$$

Nimmt man hier T′ als gegeben an, so findet man zwei Werthe für T ($T_0 < \Theta$), welche das Temperaturintervall begrenzen, innerhalb dessen der Luftwechsel beider Zimmer gesteigert ist. Ist $T < T_0$, so ist der Luftwechsel des oberen Zimmers vermindert, ist $T > \Theta$, so ist der Luftwechsel des unteren Zimmers dem freien gegenüber vermindert.

Umgekehrt kann man T als gegeben betrachten und die entsprechenden Grenzwerthe von T′ ($T'_0 < \Theta'$) berechnen.

Beispiel. Nimmt man den früheren Angaben gemäss $l_6 = l_2 = l_0$, $l_5 = l_1$, $l_2 = 5 . 35$, $l_1 = 24 . 3{,}6$, $H = H' = 3{,}6$, $t = 0$, T′ constant und gleich 20° C, so muss, damit der Luftwechsel des oberen Zimmers grösser wird als bei freier Umgebung, die Temperatur des unteren Zimmers 7,7° C überschreiten.

Das untere Zimmer hat, während seine Temperatur von 0° C an wächst, gesteigerten Luftwechsel, bis dieselbe 56,1° überschreitet. Von da an bildet das obere Zimmer ein Hinderniss für den Luftwechsel des unteren.

Wenn die Temperatur des oberen Zimmers constant 20° ist und die des unteren zwischen 7,7° und 56,1° liegt, haben beide Zimmer grösseren Luftwechsel als bei freier Umgebung.

Ist z. B. die Temperatur des unteren Zimmers ebenfalls 20°, so berechnet sich der Luftwechsel in jedem der beiden Zimmer zu 41,8 C^m, während derselbe nur 31,5 C^m betrüge, wenn jedes der beiden Zimmer durchaus von freier Luft umgeben wäre.

Vom hygienischen Standpunkt ist zu diesen Resultaten ähnliches su bemerken wie in (I). Sind beide Zimmer bewohnt, so zieht nur das untere wirklichen Nutzen aus der Steigerung des Luftwechsels, welche durch Heizen des oberen bewirkt wird. Das obere hingegen verliert bei derjenigen Steigerung seines Luftwechsels, welche durch Heizen des unteren Zimmers hervorgebracht wird, einen Theil der vortheilhaften Strömung, welche ihm durch den unteren Theil der vertikalen Wände Luft aus dem Freien zuführte, während der Strom verbrauchter Luft, der durch den Fussboden aus dem unteren Zimmer eindringt, um mehr als jenen Verlust anwächst. Es sind somit auch an dieser Stelle, also für den im Winter bei weitem häufigsten Fall, dem oben Wohnenden die in (I) angegebenen Massregeln zu empfehlen.

Zusammenstellung

der Formeln, welche zur Berechnung des Luftwechsels zweier Zimmer dienen, deren eines über dem anderen liegt.

1. Oberes Zimmer.

a) Wenn

$$p_2 < \frac{L'}{l_2} p_4$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{2 p'}.$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_5 \frac{(p_6 + \varrho)^2}{2 p'}.$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_6 (p_6 + \varrho).$$

b) Wenn

$$p_2 > \frac{L'}{l_2} p_4,$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

Null.

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$\frac{1}{2} l_5 (p_6 - p_4 + 2 \varrho).$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_6 (p_6 + \varrho).$$

2. Unteres Zimmer.

a) Wenn

$$p_2 > \frac{l_2}{L} p_4$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_0 (p_0 + \gamma).$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_1 \frac{(p_0 + \gamma)^2}{2 p}.$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

$$l_1 \frac{(p_2 - \gamma)^2}{2 p}.$$

Ausströmung durch die Decke:

$$l_9 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

b) Wenn

$$p_2 < \frac{l_2}{L} p_4,$$

Einströmung durch den Boden:

$$l_0 (p_0 + \gamma).$$

Einströmung durch die vertikalen Wände:

$$\frac{1}{2} l_1 (p_0 - p_2 + 2\gamma).$$

Ausströmung durch die vertikalen Wände:

Null.

Ausströmung durch die Decke:

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right].$$

Hiezu kommt:

$$\varrho = \frac{l_2 (L p_2 - l_2 p_4)}{L L' - l_2^2},$$

$$\gamma = \frac{l_2 (L' p_4 - l_2 p_2}{L L' - l_2^2};$$

$$p_2 = p \frac{l_0 + \frac{1}{2} l_1}{L}; \quad p_0 = p \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L}$$

$$p_4 = p' \frac{l_6 + \frac{1}{2} l_5}{L'}; \quad p_6 = p' \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_5}{L'}$$

$$p = H \,.\, 1{,}293 \frac{B}{760} \cdot \frac{T - t}{270 + T + t}$$

$$p' = H' \,.\, 1{,}293 \frac{B}{760} \cdot \frac{T' - t}{270 + T' + t}.$$

III.

Verallgemeinerung der Resultate.

Es sollen nun die Bedingungen angegeben werden, unter denen die im zweiten Theil (II) erhaltenen Formeln für die übrigen Fälle gelten, welche durch Abänderung der Beziehungen zwischen den 3 Temperaturen T', T, t combinirt werden können.

1) Die früher (in I) behandelten Aufgaben, wo eines der beiden Zimmer die Temperatur der Umgebung hat, das andere aber eine höhere Temperatur, sind unbedingt besondere Fälle von (II). Je nachdem das untere oder das obere Zimmer das kältere ist, wird $T = t$ oder $T' = t$, und da im ersten Fall, wegen

$$p = 0, \; p_2 = 0,$$
$$p_2 < \frac{l_2}{L} p_4 \text{ und } p_2 < \frac{L'}{l_2} p_4 \text{ ist;}$$

im zweiten Fall, wegen

$$p' = 0, \; p_4 = 0,$$
$$p_2 > \frac{L'}{l_2} p_4 \text{ und } p_2 > \frac{l_2}{L} p_4,$$

so gilt für das Zimmer, welches die Temperatur der Umgebung hat, der in der Zusammenstellung (S. 485 ff. unter b) verzeichnete, für das wärmere der unter a) aufgeführte Luftwechsel.

2) Sind beide Zimmer kälter als die Umgebung, so sind ebenfalls sämmtliche Formeln unbedingt zulässig. Da $T < t$ und $T' < t$, werden sämmtliche Ueberdrücke negativ, und auch die Veränderungen derselben (ϱ, γ) wechseln ihr Vorzeichen. Die Luftwechsel erscheinen mit negativem Vorzeichen, was auf den thatsächlich eingetretenen Wechsel in der Richtung der Luftströmungen hinweist.

In den Ungleichungen, welche zwischen den Formeln des Luftwechsels entscheiden, sind die absoluten Werthe der Ueberdrücke p_2 und p_4 anzuwenden.

3) Hat eines der beiden Zimmer die Temperatur der Umgebung, während das andere

kälter ist, so sind ebenfalls sämmtliche Formeln unbedingt anwendbar, und zwar gelten aus analogen Gründen wie in 1) für das Zimmer, welches die Temperatur der Umgebung hat, die unter b) vorgetragenen Formeln, hingegen für das kältere die unter a) eingesetzten.

4) Zuletzt ist noch denkbar, dass das eine Zimmer kälter, das andere wärmer als die Umgebung ist. Dieser Fall soll besonders erklärt werden.

Ist das obere Zimmer wärmer, so ist zu beiden Seiten der horizontalen Trennungsschicht der Luftdruck geringer als im gleichen Niveau der Umgebung, und es ist zunächst sowohl für die Richtung als für die Menge der durch die Zwischenschicht strömenden Luft die Differenz der beiden Minderdrücke (p_2 und p_4) massgebend. Ist (absolut) $p_2 > p_4$, so wirkt der geringere Minderdruck (p_4), dem grösseren Minderdruck (p_2) gegenüber als Ueberdruck, und es geht die Luft durch die Decke von oben nach unten; hingegen strömt sie von unten nach oben, wenn $p_2 < p_4$ ist.

Da nun bei vollständig freier Umgebung beider Zimmer die Luft sowohl durch den Boden in das obere Zimmer als durch die Decke in das untere einströmen würde, beides zugleich aber bei der Combination der Zimmer unmöglich ist, so ist in einem der beiden Zimmer der Luftwechsel abnorm. Die neutrale Zone scheidet hier die Flächen nicht mehr in einlassende und hinauslassende, sondern es liegen auf derselben Seite der neutralen Zone Flächen, welche sich in entgegengesetztem Sinn am Luftwechsel betheiligen.

Analoge Erwägungen führen zu dem allgemeinen Resultat, dass der stationäre Luftwechsel in demjenigen der beiden Zimmer dem freien ähnlich ist, in welchem, zunächst der Zwischenschicht, der grössere Ueberdruck oder Minderdruck besteht.

Also in dem oberen, wenn dem absoluten Zahlenwerthe nach

$$p_4 - \varrho > p_2 - \gamma,$$

und in dem unteren, wenn umgekehrt

$$p_2 - \gamma > p_4 - \varrho.$$

Dieser dem normalen ähnliche Luftwechsel wird durch die in der Zusammenstellung (S. 485 ff.) unter a) gegebenen Formeln ausgedrückt. Denn da in diesem Fall der Luftstrom durch die Zwischenschicht immer schwächer ist als bei freier Umgebung, so hat im oberen Zimmer ($- \varrho$) mit p_4, im unteren ($- \gamma$) mit p_2 gleiches Vorzeichen, und es kann nicht vorkommen, dass $p_4 - \varrho$ oder $p_2 - \gamma$ Null oder negativ werden. Auch bleibt nothwendig $p_4 - \varrho < p'$ und $p_2 - \gamma < p$, da ausserdem nur eine Art der Strömung im Zimmer stattfinden würde.

Auch der abnorme Luftwechsel des anderen Zimmers ist durch die Formeln der Zusammenstellung (S. 485 ff.) gegeben, und zwar durch die unter a) vorgetragenen, wenn (absolut)

$$p_4 - \varrho < p',$$

beziehungsweise

$$p_2 - \gamma < p;$$

hingegen durch die Formeln b), wenn (absolut)

$$p_4 - \varrho > p',$$

beziehungsweise

$$p_2 - \gamma > p.$$

Man sieht, dass für die Wahl der Formeln die Erwägung, ob der Luftwechsel normal oder abnorm ist, nicht entscheidet; sondern dass man sich auf Beachtung der zuletzt angeschriebenen vier Ungleichungen beschränken kann.

Bei allen Uebertragungen der Formeln (Zusammenstellung S. 485 ff.) auf Fälle, für welche sie nicht direkt abgeleitet sind, ist zu beachten, dass, so oft ein Glied des Luftwechsels negativ ausfällt, die Art der Strömung der in der Ueberschrift angegebenen entgegengesetzt ist, also Einströmung durch Ausströmung und umgekehrt ersetzt werden muss.

Beispiel. Gelten für die beiden Zimmer die den früheren Rechnungen zu Grund gelegten Annahmen:

$$l_0 = l_2 = l_6 = 175, \; l_1 = l_5 = 86{,}4, \; H = H' = 3{,}6$$
$$T' = 20^0, \; t = 0^0, \text{ aber } T = -10^0;$$

so ist (der Barometerstand $= 760^{mm}$ vorausgesetzt)

$$p' = 0{,}32, \; p_4 = p_6 = 0{,}16$$
$$p = -0{,}176, \; p_0 = p_2 = -0{,}088$$
$$\varrho = -0{,}073$$
$$\gamma = +0{,}093.$$

Da dem absoluten Zahlenwerth nach

$$p_2 - \gamma < p_4 - \varrho,$$

so geht der Strom durch die Decke aufwärts, und der dem freien ähnliche Luftwechsel des oberen Zimmers kann nach der Formel 1) a

$$W' = l_5 \frac{(p_4 - \varrho)^2}{2\,p'} + l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right]$$

berechnet werden. Man findet 16,3 C^m für diese Einströmung, also bedeutend weniger als bei freier Umgebung, wo sie 31,5 C^m betragen würde.

Sucht man den Luftwechsel des unteren Zimmers, so erkennt man zunächst, dass (absolut)

$$p_2 - \gamma > p$$

(nämlich 0,181 > 0,176), und mithin zur Berechnung des Luftwechsels die Formeln 2) b dienen.

Man erhält

$$l_0 (p_0 + \gamma) = 175 \,.\, 0{,}005$$

oder 0,875 C^m für die Einströmung durch den Boden,

$$\frac{1}{2}\, l_1 (p_0 - p_2 + 2\,\gamma) = 86{,}4 \,.\, 0{,}093$$

oder 8,035 C^m für die Einströmung durch die vertikalen Wände.

Diese 8,9 C^m strömen durch die Decke aus, was man durch Berechnung der Formel

$$l_2 \left[p_4 + p_2 - (\varrho + \gamma)\right] = 175 \,.\, 0{,}052,$$

in den ganzen Cubikmetern übereinstimmend, ebenfalls findet.

Bei freier Umgebung würde der Luftwechsel des unteren Zimmers 17,3 C^m betragen haben.

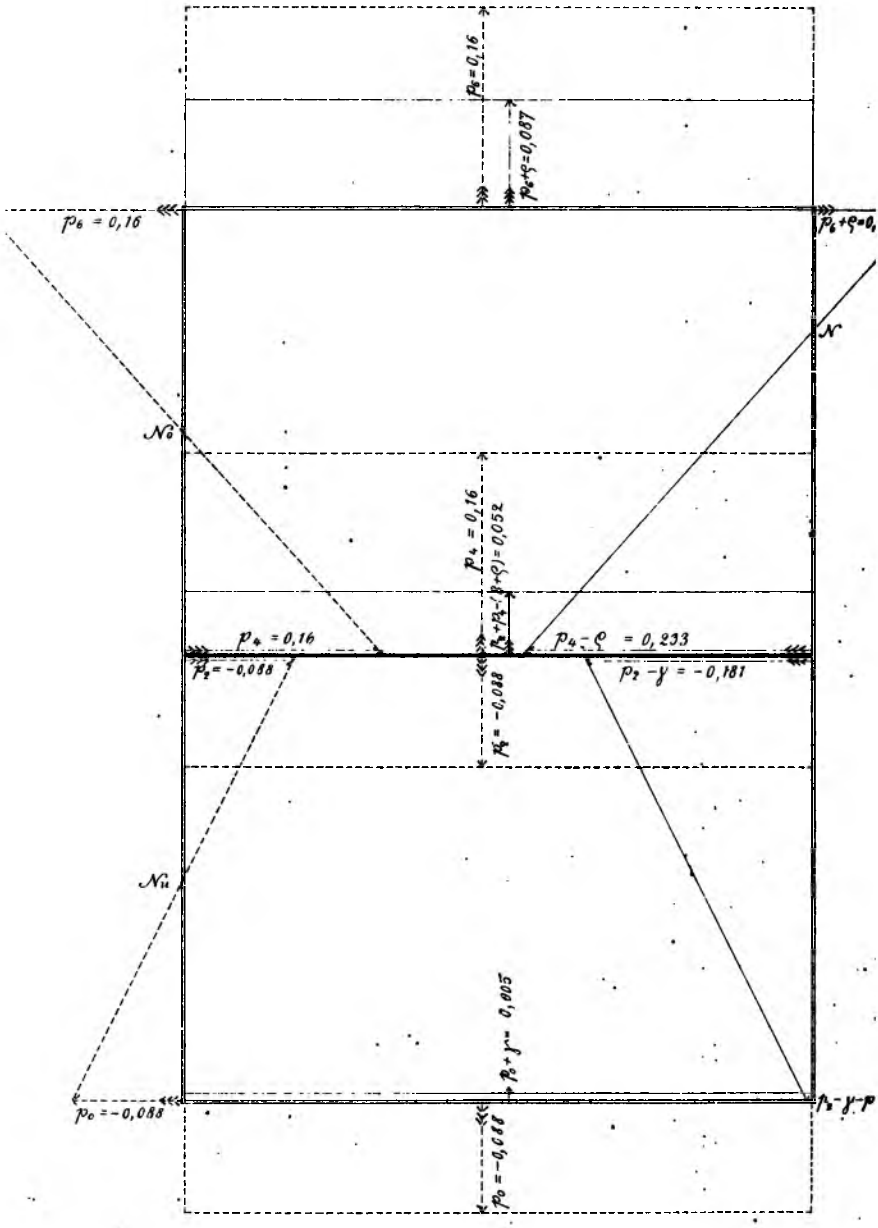
Die starken Veränderungen, welche in dem berechneten Beispiel durch gegenseitige Einwirkung der beiden Zimmer entstehen, machen dasselbe besonders instruktiv.

Die Figur (Nr. 3) gibt eine graphische Darstellung der Druckvertheilung, welche aus den der Rechnung zu Grunde liegenden Angaben folgt. Die Begrenzung der Zimmer ist durch Doppelstriche angegeben. Durch die punktirten Linien sind diejenigen Ueberdrücke begrenzt, welche bei vollständig freier Umgebung in jedem einzelnen Zimmer den Luftwechsel bewirken würden. Die einfach ausgezogenen Linien begrenzen die Ueberdrücke, welche sich entwickelt haben, nachdem die Combination beider Zimmer einen Beharrungszustand erreicht hat.

Im unteren Zimmer fehlt schliesslich die neutrale Zone, welche vorher bei N_u lag, und es strömt sowohl durch die ganze vertikale Begrenzung (unter dem mittleren Ueberdruck $\frac{0{,}181 + 0{,}005}{2}$) als durch den Boden (unter dem Ueberdruck 0,005) Luft ein, während eine gleich grosse Luftmasse (unter dem Ueberdruck 0,052) durch die Decke entweicht.

Im oberen Zimmer lag die neutrale Zone vorher bei N_o und ist schliesslich nach N hinaufgerückt, weil der stark verminderten Boden-Einströmung verminderte Ausströmung entsprechen muss.

Figur 3.



Lith. Anstalt v. Gebrüder Obpacher, München.

Anhang.

Experimentelle Bestimmung der Durchlässigkeiten eines Zimmers.

1. Beschreibung des Zimmers. Das Zimmer, dessen Durchlässigkeiten ermittelt wurden, liegt im Erdgeschoss des Schulgebäudes der Industrieschule zu Kaiserslautern. Es ist 3,6 Meter hoch, wendet eine mit 2 Fenstern versehene 7^m lange Seite nach Süd-Süd-Ost, die zweite 5^m lange Seite ebenfalls mit 2 Fenstern nach West-Süd-West. Diese beiden Mauern haben eine Dicke von $0,80^m$. In den vier Fensternischen, deren jede $1,22^m$ breit, $2,40^m$ hoch ist und zudem oben mit einem halbkreisförmigen Bogen von $0,60^m$ Radius abschliesst, ist die Mauer bis zu einer Höhe von $0,80^m$ nur $0,40^m$ dick. Es folgt nach NNW eine Wand von 7^m Länge und $0,50^m$ Dicke, welche das untersuchte Zimmer von einem grösseren Nebenzimmer trennt und eine Thüre von 2^m Höhe und 1^m Breite enthält. Die vierte Wand ist 5^m lang, $0,50^m$ dick, enthält eine Thüre von gleichen Dimensionen wie die vorige und scheidet das Zimmer von der Hausflur.

Sämmtliche Wände sind von rothem Sandstein (Bruchsteinen) aufgeführt, innen mit Mörtel beworfen und mit grüner Kalkfarbe angestrichen. Aussen steht der Bau rauh und ist bis zu einer Höhe von $1,35^m$ mit Sandsteinplatten belegt.

Der Fussboden ist gediehlt. Die Diehlen sind vor 5 Jahren mit einem Oelfarb-Anstrich versehen worden, der an den zugänglichen Stellen ziemlich abgetreten ist. Zwischen den Diehlen befinden sich Zwischenräume von 3 bis 5 Millimeter Breite, welche, einem besonders angestellten Versuch gemäss, der Luft soweit freien Durchgang gestatten, dass diesseits und jenseits der Diehlen sich eine merkliche Druckdifferenz nicht ausbildet. Unter dem Zimmer ist kein Keller.

Dasselbe liegt als südwestliches Eckzimmer des Hauses, welches an einen von Süd nach Nord aufsteigenden Bergabhang gebaut ist, über einer Aufmauerung von 1^m Höhe welche nach Süden 3^m, nach Westen 6^m vorspringt und, soweit sie vorspringt, mit einer Gartenanlage versehen ist.

Die Decke ist $0{,}30^m$ dick, unter der Balkenlage verschalt, mit Mörtel beworfen und mit einem ganz dünnen Gypsanstrich versehen. Schadhafte Stellen der Decke, welche durch Senkung (Einschlagen) entstanden waren, sind im Herbst 1877 mit Gyps oberflächlich ausgebessert worden. Die Decke trennt das Versuchsobjekt von einem Zimmer, welches in den Dimensionen und der Beschaffenheit des Fussbodens jenem ziemlich gleich ist.

Durch die Decke führt ein durch ein Blechrohr begrenzter Luftkanal von $0{,}20^m$ Durchmesser, den ich zum Zwecke der Ventilationsversuche habe herstellen lassen. Der Kanal kann oben durch einen mit Werg umwickelten eingepassten Holzdeckel verschlossen werden.

2. Die Versuche. Das Manometer stand im Versuchszimmer auf einem etwa $0{,}80^m$ über dem Boden an der nördlichen Wand befestigten Brett und war mit Petroleum gefüllt.

Als am Abend des 27. Mai, nachdem den Tag über schwacher Ostwind geweht hatte, Windstille eingetreten war, wurde das über dem Versuchszimmer liegende Zimmer geheizt, während in jenem, sowie in der Hausflur und im Nebenzimmer durch Oeffnen aller Fenster und Thüren Ausgleich der Temperaturen angestrebt wurde. Da trotzdem noch innerhalb des Hauses die Temperatur etwas niedriger war als im Freien, so wurde abgewartet, bis (zwischen 7 und 8 Uhr Abends) die Temperatur der äusseren Luft auf die des Hauses herabgesunken war.

Nun wurde das Versuchszimmer vollständig abgeschlossen und folgende Beobachtung gemacht.

a) Die Bestimmung des Nullpunkts am Manometer ergab

11,0.

Vom äusseren Niveau des Manometers führt ein Schlauch nach einem unmittelbar über dem Fussboden (in der Fensternische) durch die westliche Mauer gesteckten Rohr: das Manometer zeigt

11,2.

Vom äusseren Niveau des Manometers führt überdies ein Schlauch nach einem durch die Decke gesteckten Rohr: Manometerablesung:

12,2.

Nullpunkt:

11,0.

Bezeichnet ν den Reductionsfaktor der Manometerablesung auf vertikale Millimeter Wasser, so sagt der Versuch, dass durch den Boden und die vertikale Begrenzung unter einem Ueberdruck von 0,2 ν (Kilogramm per Quadratmeter) eben so viel Luft in das Zimmer drang, als gleichzeitig unter einem Ueberdruck von 1,0 ν (Kilogr. per $\square^m$) durch die Decke entwich.

Ist f der Flächeninhalt des Bodens sowie der Decke, u der Umfang des Bodens, H die Höhe des Zimmers, also u H der Flächeninhalt der vertikalen Wände, ferner k_0 die Durchlässigkeit des Bodens [Anzahl der Cubikmeter Luft, welche in der Stunde unter 1 Kilogr. Ueberdruck durch das Quadratmeter gehen], so ist $l_0 = k_0 f$ das Lüftungsvermögen des Bodens, $l_1 = k_1 u H$ das Lüftungsvermögen der vertikalen Begrenzung, $l_2 = k_2 f$ das Lüftungsvermögen der Decke und $L = l_0 + l_1 + l_2$ das Lüftungsvermögen des ganzen Zimmers.

Der Versuch gibt

$$0{,}2\,\nu\,(l_0 + l_1) = 1{,}0\,\nu\,l_2$$

oder

$$l_0 + l_1 = 5\,l_2,$$

d. h. bei gleichem Ueberdruck würden Boden und vertikale Begrenzung zusammen fünfmal soviel Luft durchlassen als die Decke.

b) Um grössere Ausschläge zu erhalten, liess ich nun einen Kanal öffnen, welcher durch die Decke des oberen Zimmers hindurch führt. Im Versuchszimmer selbst wurde nichts geändert.

Nun folgten folgende Beobachtungen am Manometer:

Vom inneren Niveau gieng der Schlauch nach dem durch die vertikale Begrenzung gesteckten Rohr, während zugleich vom äusseren ein Schlauch nach dem durch die Decke gehenden Rohr führte.

Ablesungen:

13,0
13,1
13,2

Die Verbindung des Manometers mit der Decke wurde gelöst:

Ablesungen:

11,4
11,3

Nullpunkt:

11,0.

Es sind mehrere Ablesungen gemacht worden, weil, jedenfalls durch den Einfluss einer leichten Windwelle, das Manometer etwas unruhig war.

Die Mittelwerthe geben die Gleichung:

$$0{,}35\,\nu\,(l_0 + l_1) = 1{,}75\,\nu\,l_2$$

oder

$$l_0 + l_1 = 5\,l_2$$

wie vorhin.

Weitere Versuche wurden an diesem Abend nicht mehr ausgeführt, weil die äussere Temperatur schon etwas unter die Temperatur des Zimmers gesunken war.

c) Der nächste Versuch wurde am 21. Juni angestellt, wiederum nachdem am Abend Windstille eingetreten war. Er hatte die Ermittlung der normalen Lage der neutralen Zone zum Ziel.

Nachdem die Umgebung durch Oeffnen aller ins Freie führenden Fenster und Thüren möglichst frei gemacht worden war, wurde das Versuchszimmer durch einen eisernen Mantelofen geheizt, bis ein 2 Meter hoch über dem Fussboden aufgehängtes Thermometer 24.6 ° C anzeigte. Die Temperatur der Umgebung war gleichzeitig 18,8 ° C.

Dann folgten nach Verschluss aller Zugöffnungen des Ofens sowie der Ofenklappe folgende Beobachtungen am Manometer:

Nullpunkt:

39,1.

Das innere Niveau war mit dem unmittelbar über dem Fussboden ins Freie führenden Rohr verbunden.

Ablesung:

40,2.

Das innere Niveau wie vorhin, das äussere war mit dem durch die Decke führenden Rohr verbunden.

Ablesung:

43,0.

Bezeichnet p_0 den Ueberdruck, welchen unmittelbar am Boden die äussere Luft über die innere, p_2 den Ueberdruck, welchen an der Decke die innere Luft über die äussere besitzt, so folgt aus dem Versuch

$$p_0 = \nu \,.\, 1{,}1 \text{ (Kilogr. per } \square^m)$$

$$p_0 + p_2 = \nu \,.\, 3{,}9 \text{ (Kilogr. per } \square^m)$$

Ist h die Höhe der neutralen Zone über dem Boden, so ist allgemein

$$h = \frac{p_0}{p_0 + p_2} H,$$

also hier

$$h = \frac{11}{39} H \text{ oder } 0{,}28 \text{ H.}$$

Da H = $3{,}6^m$, liegt die neutrale Zone $1{,}0^m$ über dem Fussboden, und es dringt demnach bei vollständig freier Umgebung durch den Fussboden und den unteren 1^m hohen Theil der vertikalen Begrenzung eben so viel Luft ein, als durch die Decke und den oberen $2{,}6^m$ hohen Theil der vertikalen Wände entweicht.

Die Lage der neutralen Zone ist von der Temperatur unabhängig, sie ändert sich nur dann, wenn die Durchlässigkeitsverhältnisse andere werden oder die Umgebung aufhört frei zu sein.

d) Zu dem gleichen Zwecke wie der dritte wurde ein vierter Versuch angestellt, nachdem die Temperatur des Zimmers auf $27{,}1^0$ gestiegen, die der Umgebung auf $17{,}8^0$ gesunken war. Bei gleicher Reihenfolge wie vorhin wurde abgelesen

Nullpunkt:

39,2

Ablesung (1):

40,9

Ablesung (2):

45,5

Daraus folgt:

$$p_0 = \nu \,.\, 1{,}7$$

$$p_0 + p_2 = \nu \,.\, 6{,}3$$

und

$$h = \frac{17}{63} H = 0{,}27 \, H$$

in guter Uebereinstimmung mit dem vorigen Werthe.

Die Kenntniss der Lage der neutralen Zone lässt sich zur Bestimmung der Durchlässigkeiten verwerthen mittelst der Gleichung

$$\frac{p_0}{p_0 + p_2} = \frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L}.$$

Im Mittel ist demnach

$$\frac{l_2 + \frac{1}{2} l_1}{L} \doteq 0{,}275.$$

Schon hieraus folgt, dass der Boden vielmal durchlässiger ist als die Decke.

Fasst man die Resultate der bisherigen (4) Versuche zusammen, so ergeben sich zwischen den Lüftungsvermögen die einfachen Beziehungen

$$\begin{aligned} l_1 &= 1{,}3\ l_2 \\ l_0 &= 3{,}7\ l_2 \\ L &= 6\ l_2, \end{aligned}$$

welche durch sehr einfache und rasch verlaufende manometrische Beobachtungen gewonnen sind.

e) Ein fünfter Versuch sollte zur Ermittelung des gesammten Lüftungsvermögens (L) dienen, auf Grundlage des früher (S. 455) bewiesenen Satzes, dass diese Constante erhalten wird, wenn man die durch einen einlassenden oder hinauslassenden Kanal stündlich strömende Luftmenge durch die Aenderung des Ueberdrucks dividirt, welche an irgend einer Stelle der Umgrenzung des Zimmers durch Eröffnung des Kanals hervorgebracht wird.

Es wurde der Kanal geöffnet, welcher durch die Decke führt. Ein Gehilfe hielt das Anemometer an einer langstieligen Gabel in die Mitte des Kanals, während ich am Manometer die Veränderung beobachtete, welche in dem vorher abgelesenen Werthe von p_0 vor sich gieng.

Das Manometer stieg von

41,05 auf 43,45.

Das Anemometer machte 327 Umdrehungen in der Minute, was nach der für dasselbe ermittelten Formel

$$v = 0{,}174 + 0{,}1441\, n$$

für die Geschwindigkeit v den Werth $0{,}96^{m}$ gibt.

Nach Versuchen, welche ich mit einem gleichweiten Rohr angestellt habe, entspricht dieser grössten Geschwindigkeit eine mittlere von $0{,}64^{m}$, und da der Querschnitt $0{,}0314\ \square^{m}$ gross ist, strömten in der Secunde 0,020 C^{m}, somit in der Stunde 72 C^{m} Luft durch den Kanal.

Der Reductionsfactor (ν) des Manometers auf vertikale Millimeter Wasser war

$$0{,}02546,$$

so dass der beobachteten Aenderung von p_0 die Druckänderung

$$2{,}4 \,.\, 0{,}02546 = 0{,}061 \text{ (Kilogr. p. } \square^{m})$$

entspricht. Somit ist

$$L = \frac{72}{0{,}061} = 1180\ C^{m},$$

d. h. bei einem Ueberdruck von 1 Kilogr. per $\square^{m}$ würde die ganze Begrenzung des Zimmers (als eine Wand gedacht) stündlich 1180 C^{m} Luft *) durchlassen.

Nun folgt

$$l_2 = 197\ C^{m}$$
$$l_1 = 256 \text{ ,,}$$
$$l_0 = 727 \text{ ,,}$$

---

*) Die Luft hatte bei einem Barometerstande von 745^{mm} eine Temperatur von $27{,}6^{0}$. Zur Reduction auf normale Cubikmeter dient der Divisor

$$\frac{760}{745}\left(1 + \frac{27{,}6}{270}\right) = 1{,}124.$$

Durch die Reduction vermindern sich das Lüftungsvermögen L und mit ihm l_0, l_1, l_2 um 11 Procent ihres Werthes, ebenso die Durchlässigkeiten k_0, k_1, k_2, daher ist die Correctur bei Versuchen über die Beständigkeit der Durchlässigkeiten wesentlich.

und die Durchlässigkeiten:

$k_2 = 5{,}6$ Cm per Stunde und □m
$k_1 = 3{,}0$ „ „ „ „ „
$k_0 = 20{,}8$ „ „ „ „ „

f) Am Abend des 25. Juni wurde, wiederum bei Windstille, ein Versuch ausgeführt, welcher wie der fünfte die Ermittelung des gesammten Lüftungsvermögens (L) zum Ziel hatte.

Als Abzugskanal wurde dieses Mal das 0,034 □m grosse Zugloch des geheizten Mantelofens benützt.

Das Anemometer wurde so gehalten, dass die Speichen des Flügelrades sich im äussersten (nächsten) Querschnitt des Zugkanals bewegten, also die Einströmungsöffnung und die beobachtete Geschwindigkeit voll in Rechnung zu bringen waren.

Ich erhielt folgende Resultate:

Zunahme des Ueberdrucks von aussen nach innen in Theilstrichen des Manometers:	Umdrehungen des Anemometers in der Minute:
1,7	127
1,6	107
1,65	108
1,65	95

Daraus berechnet sich eine mittlere Zunahme des Ueberdrucks von 1,65 Theilstrichen oder 0,042 Kilogr. per □m und eine mittlere Geschwindigkeit von 0,43m. In der Stunde würden in das Zugloch strömen

52,56 Cm,

und es folgt

$$L = \frac{52{,}56}{0{,}042} = 1250 \; C^m,$$

was um 6 % grösser ist als die früher gefundene Zahl. *)

3. Folgerungen.

a) Am 27. Mai war der Luftwechsel, welchen man dem unteren ungeheizten Zimmer durch Heizen des oberen verschaffte, zunächst, ehe der Kanal in der Decke des oberen Zimmers geöffnet wurde,

$$\nu \,.\, 1{,}0 \; l_2 \text{ oder } \nu \,.\, 0{,}2 \; (l_0 + l_1).$$

Da ν damals den Werth 0,0972 hatte und $l_2 = 197$ ist, folgt für den Luftwechsel

$$19{,}1 \; C^m.$$

b) Durch Oeffnen des Kanals in der Decke des oberen (geheizten) Zimmers steigerte sich der Luftwechsel des unteren auf

$$0{,}0972 \,.\, 1{,}75 \; l_2 \text{ oder } 33{,}5 \; C^m.$$

c) Am 21. Juni, wo das Versuchszimmer selbst geheizt war [seine Temperatur war 27,1 °, während die Temperatur der Umgebung 17,8 ° betrug] strömte durch den Boden ein die Luftmenge

$$l_0 \; p_0 ,$$

durch den unterhalb der neutralen Zone liegenden Theil der vertikalen Wände

$$k_1 \; u \; h \; \frac{p_0}{2} \,.$$

Dabei ist

$$\begin{aligned} l_0 &= 727 \\ p_0 &= 1{,}7 \,.\, 0{,}02546 = 0{,}043 \\ k_1 &= 3 \\ u &= 24 \\ h &= 0{,}275 \; H = 0{,}99, \end{aligned}$$

*) Die Temperatur der Luft war 20 °, der Barometerstand 746^{mm}. Durch die Reduction auf normale Cubikmeter gehen demnach hier 9 Procent des Werthes von L ab.

so dass durch den Boden kamen

$$31{,}3\ C^m$$

und durch die vertikale Wand

$$1{,}5\ C^m,$$

im Ganzen

$$32{,}8\ C^m.$$

d) Für eine von 9,3 ° verschiedene Temperaturdifferenz ($\triangle$) findet man den Luftwechsel (W_1) des Zimmers mit Annäherung aus der Proportion

$$W_1 : 32{,}8 = \triangle : 9{,}3\,,$$

woraus

$$W_1 = 3{,}53\ \triangle$$

folgt.

Bei dieser Rechnung ist Windstille und vollständig freie Umgebung vorausgesetzt, d. h. die normalen Umstände wie sie am Abend des 21. Juni stattfanden.

e) Der fünfte Versuch (vom 21. Juni) gibt auch die Mittel, die Zunahme des Luftwechsels zu finden, welche durch das Oeffnen des Abzugskanals erzielt wurde.

Nach dem Oeffnen des Kanals war nämlich

$$p_0 = 4{,}05 \quad \nu = 0{,}103\,,$$

während sich p_2 aus der grössten im Kanal beobachteten Geschwindigkeit von $0{,}96^m$ mittelst der Formel

$$p_2 = \frac{1}{2}\, m\, v^2 = \frac{1}{2}\, 0{,}117 \,.\, 0{,}92 = 0{,}054$$

berechnet. (Der Barometerstand war 745^{mm}, die Temperatur der strömenden Luft 27,6 °.)

Somit war die neutrale Zone, welche ausserdem in der Höhe 0,275 H liegt, bis in die Höhe $\frac{103}{157}$ H $= 0{,}656$ H gerückt, und es strömten durch den Boden unter dem Ueberdruck 0,103 und durch die unteren zwei Drittel der vertikalen Wände unter dem mittleren Ueberdruck $\frac{0,103}{2}$ um 72 C^m Luft per Stunde mehr ein als durch das obere Drittel der vertikalen Begrenzung (unter dem mittleren Ueberdruck $\frac{0,054}{2}$) und durch die Decke (unter dem Ueberdruck 0,054) entwich.

Berechnet man die zwei letzten Posten, so findet man

$$3 \cdot 24 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}027 = 2{,}3 \text{ C}^m,$$
$$197 \cdot 0{,}054 = 10{,}6 \text{ C}^m.$$

Somit ist die Gesammtmenge der abziehenden Luft

$$72 + 2{,}3 + 10{,}6 = 85 \text{ C}^m,$$

während sie bei der gleichen Temperaturdifferenz (10,2 °) ohne den Abzugskanal nur 36 C^m würde betragen haben. Der wahre Ventilationseffekt des Kanals ist demnach auf 49 C^m anzuschlagen. Indem der Kanal die Poren-Ventilation des Zimmers zurückdrängt, ist er weit entfernt, den gesammten Luftwechsel um das zu steigern, was durch ihn hindurchgeht.