

Luftwechsel in Wohnungen

Von Dipl.-Ing. Gerhard Hausladen, München



Die steigenden Anforderungen an die Wärmedämmung der Bauteile führen zu einer Senkung des Transmissionswärmebedarfs. Der Lüftungswärmebedarf nimmt damit einen immer größer werdenden Anteil am gesamten Wärmebedarf eines Gebäudes ein, beeinflusst also in immer stärkerem Maße die Größe und die regeltechnische Ausstattung der Heizanlagen. Gleichzeitig ist man bestrebt, auch den Lüftungswärmebedarf durch hohe Anforderungen an die Dichtheit der Bauwerke, vor allem der Fenster, zu senken.

Der Verfasser untersucht in seinem Beitrag, ob der durch die Undichtheiten eines Gebäudes stattfindende natürliche Luftaustausch noch ausreichend ist, um den Bewohnern das hygienisch notwendige Minimum an Außenluft zukommen zu lassen oder ob die Außenluftzufuhr auf andere Weise gesichert werden muß.

Natürlicher Luftwechsel und dessen Ursachen

Unter natürlichem Luftwechsel soll im folgenden der Austausch von Raumluft mit Außenluft bei geschlossenen Fenstern verstanden werden. Dem Fenster kommt nicht die Aufgabe einer ständig wirksamen Dauerlüftungseinrichtung zu, sondern mit seiner Hilfe soll eine kurzzeitige Stoßlüftung herbeigeführt werden können. Liegt eine Wohnung in einer lärmreichen Gegend, z.B. an einer vielbefahrenen Straße oder in der Nähe eines Flughafens, so führt jedes Öffnen eines Fensters zu einer Belästigung durch den eindringenden Lärm. Während der Heizperiode führt jedes Offenhalten eines Fensters zum Zwecke der Dauerlüftung zu einem unnötig hohen Energieverbrauch.

Interessant ist also der Luftaustausch einer Wohnung bei geschlossenen Fenstern, wodurch er bewirkt wird und welche Größe er erreichen kann.

Ursachen des Luftwechsels sind:

- Druckkräfte am Gebäude infolge von Wind und infolge von Temperaturunterschieden zwischen der Innen- und der Außenseite eines Gebäudes,
- Undichtheiten des Bauwerks.

¹ Aus dem Institut für Haustechnik der Technischen Universität München

Druckdifferenzen infolge von Wind und Thermik

Die infolge von Windanfall an einem Gebäude auftretenden Druckdifferenzen sind von verschiedenen Gegebenheiten abhängig. Dies sind insbesondere:

- Geometrische Abmessungen eines Gebäudes (Verhältnis von Länge zu Breite zu Höhe, Dachform),
- Umgebung des Gebäudes,
- Anströmrichtung des Windes.

Vereinfachend kann die auf Bild 1 gezeigte Druckverteilung an einem Gebäude angesetzt werden. Auf der windzugewandten Seite entsteht ein Überdruck, der die Größe des dynamischen Druckanteils des Windes erreichen kann. Auf den nicht vom Wind angeströmten Seiten und auf dem Dach bildet sich ein Unterdruck aus, der etwa der Hälfte des dynamischen Druckanteils des Windes entspricht. Daß diese Annahme nur eine grobe Annäherung sein kann, geht aus Bild 2 hervor, auf dem die Druckverteilung durch die gegenseitige Beeinflussung zweier im Verband stehender Gebäude dargestellt ist.¹⁾ Ähnlich wie in einem Schornstein erzeugen Temperaturunterschiede zwischen dem Innern und dem Äußern eines Gebäudes Druckkräfte,

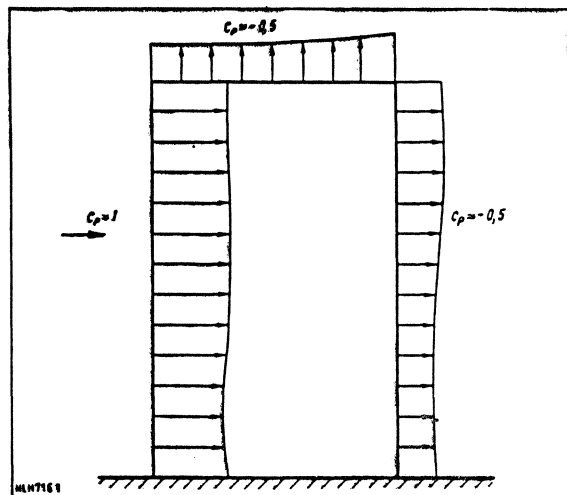


Bild 1: Druckverteilung an einem einzeln stehenden Gebäude

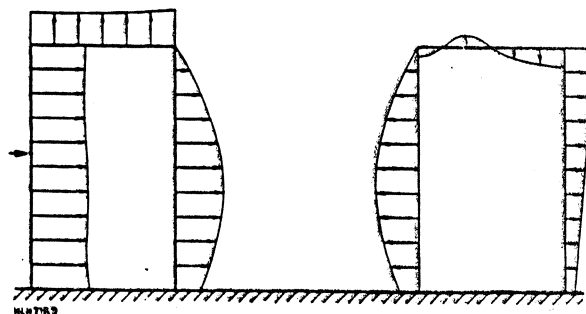


Bild 2: Druckverteilung an zwei im Verband stehenden Gebäuden

¹⁾ Nach Untersuchungen am Institut für Strömungsmechanik der Technischen Universität München.

welche von der Größe der Temperaturdifferenz, der Höhe des Gebäudes und der Lage und Größe der äußeren und inneren Gebäudeundichtheiten abhängig sind.

Die Verteilung der Druckdifferenzen über die Höhe eines Gebäudes ist schematisch auf *Bild 3* dargestellt. Denkt man sich die gesamten Undichtheiten eines Gebäudes in einer bestimmten Höhe zusammengefaßt, so ergibt sich an dieser Stelle Druckgleichheit zwischen innen und außen. Im übrigen Gebäude entstehen ein Über- oder Unterdruck, je nach Höhenlage der Undichtheitsstelle (1. Reihe links und Mitte). Da die Undichtheit auf eine Stelle beschränkt ist, kann eine Durchströmung des Gebäudes nicht stattfinden.

Mit gleich großen Öffnungen im oberen und unteren Teil des Gebäudes stellt sich in der oberen Gebäudehälfte ein Überdruck und in der unteren ein Unterdruck ein. Das Gebäude wird von unten nach oben von Luft durchströmt. In der Gebäudemitte bildet sich eine neutrale Zone, in der Druckgleichheit zwischen innen und außen herrscht (1. Reihe links und Mitte). Nimmt nun die Undichtheit in einer der beiden Gebäudehälften zu, so verschiebt sich die neutrale Zone in die Richtung der größeren Undichtheiten (2. Reihe links und Mitte).

Unterteilt man nun das Gebäude in mehrere Geschosse, so bedeutet dies für die Luftströmung einen inneren Widerstand; es stellen sich wiederum andere Druckverhältnisse ein. Nimmt man letztlich noch die äußeren Undichtheiten gleichmäßig über die Gebäudehöhe verteilt an, so ergibt sich eine Druckverteilung, wie sie auf *Bild 3* unten rechts dargestellt ist. Wegen der inneren vertikalen Strömungswiderstände eines Gebäudes sind die in Wirklichkeit sich einstellenden Druckdifferenzen geringer als theoretisch möglich.

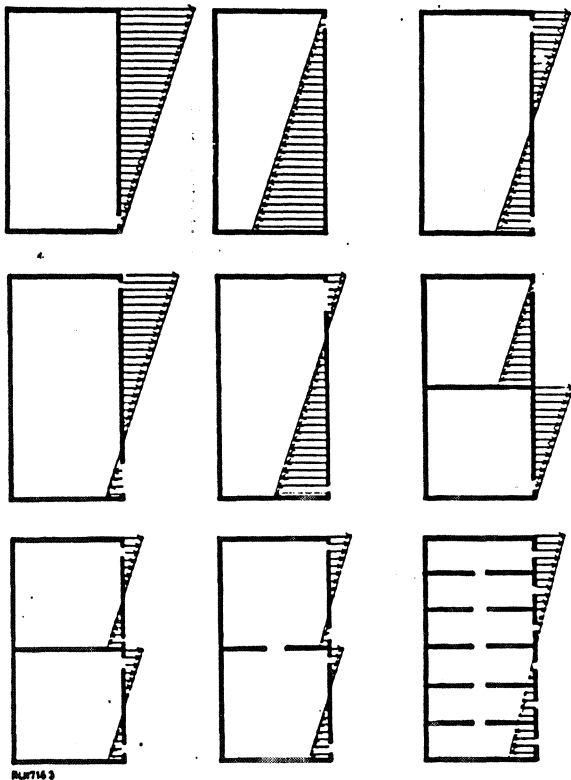


Bild 3: Druckverteilung im Treppenhaus eines mehrgeschossigen Gebäudes infolge von Temperaturdifferenzen

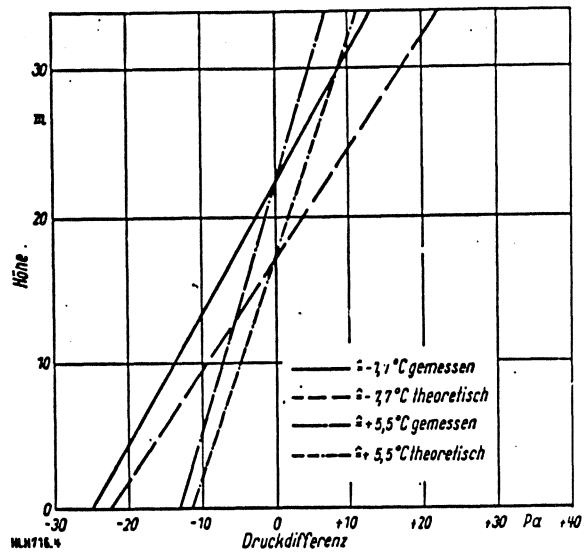


Bild 4: Druckverteilung im Treppenhaus eines Hochhauses
Nach Messungen von G. T. Tamura

Auf *Bild 4* ist die von G. T. Tamura [1] in einem 9geschossigen Gebäude bei verschiedenen Außentemperaturen gemessene Druckverteilung dargestellt. Zum Vergleich ist die theoretische Druckverteilung eingetragen, unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der äußeren Undichtheiten über die Gebäudehöhe, also unter Annahme der neutralen Zone auf halber Gebäudehöhe. Im vorliegenden Fall liegt die neutrale Zone oberhalb der Gebäudemitte, d.h. der obere Gebäudeteil muß eine größere Undichtheit aufweisen haben als der untere.

Das Verhältnis der thermischen Druckkräfte zu den vom Wind erzeugten Druckkräften zeigt *Bild 5* am Beispiel eines 5geschossigen Gebäudes. Dabei sind eine Temperaturdifferenz von 40 K und Windgeschwindigkeiten von 2,5 m/s, 5 m/s und 10 m/s zugrunde gelegt. Zu berücksichtigen ist, daß die angenommene Temperaturdifferenz von 40 K einen extremen Wert darstellt. Die genannten Windgeschwindigkeiten treten je nach Gebiet zu 30 bis 35% (2,5 m/s), 15 bis 30% (5 m/s) und 5 bis 10% (10 m/s) der Zeit auf.

Undichtheiten des Bauwerks

Den größten Unsicherheitsfaktor bei der Ermittlung des Luftwechsels stellt die Undichtheit eines Gebäudes dar, also diejenige Größe, die entscheidend ist, inwieweit Wind und Thermik überhaupt wirksam werden können. In der DIN 4701 „Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden“ ist im Berechnungsverfahren für den Lüftungswärmebedarf als einzige Größe, welche die Undichtheit des Bauwerks wiedergibt, die Fugendurchlässigkeit a^2 der Fenster angenommen.

¹⁾ Der Fugendurchlaßkoeffizient a hat in der vorliegenden Arbeit die

$$\text{Einheit } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m} (\text{kp/m}^2)^{0,5}} \right]. \text{ Wird } a \text{ in der Einheit } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m} (\text{kN/m}^2)^{0,5}} \right]$$

bzw. $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m} (\text{Pa})^{0,5}} \right]$ angegeben, so ist der zuerst genannte Wert mit $100^{0,5}$ zu multiplizieren.

Neben der Luftdurchlässigkeit der Fenster treten aber am Bauwerk weitere Undichtheiten auf. Dies sind insbesondere Fugen zwischen verschiedenen Fertigteilen, Fugen zwischen Fertigteilen und der tragenden Konstruktion eines Gebäudes und die Anschlußstellen der Fenster an die Außenwand. Die Größe dieser Undichtheiten hängt natürlich sehr von der handwerklichen Qualität der Bauausführung ab.

Um Angaben über die Größe der gesamten äußeren Undichtheiten eines Gebäudes machen zu können, sind von C. J. Shaw [2] systematische Untersuchungen an mehreren Gebäuden vorgenommen worden. Mit einer Zuluftanlage sind in den Gebäuden verschieden große Überdrücke gegenüber der Außenatmosphäre erzeugt und die dazugehörigen Luftmengen gemessen worden. Nachdem alle nach außen führenden Fenster und Türen geschlossen waren, mußte die ins Gebäude eingebrachte Luft über die Gebäudeundichtheiten entweichen; sie waren also unmittelbar ein Maß für die gesamten Undichtheiten. Auf Bild 6 ist das Ergebnis dieser Untersuchungen dargestellt, wobei die Luftdurchlässigkeit in m^3/h auf $1 m^2$ Außenwandfläche bezogen und über der an der Außenwand anliegenden Druckdifferenz aufgetragen ist. Der schraffierte Bereich gibt die Streubreite der Versuchsergebnisse für die verschiedenen Gebäude wieder. Zwei der untersuchten Gebäude waren mit einer festen Verglasung versehen. Obwohl damit die Fugendurchlässigkeit der Fenster entfallen war, hatte die gesamte Gebäudeundichtheit ungefähr die gleiche Größe wie die der übrigen Gebäude.

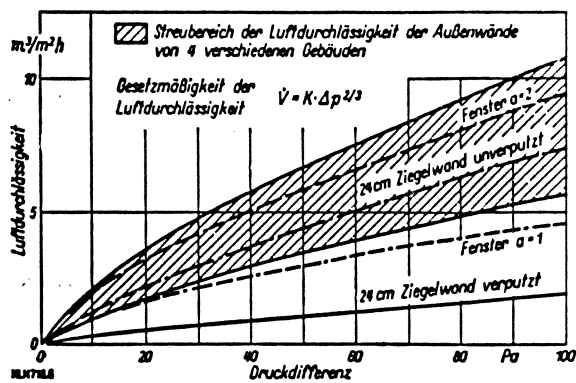


Bild 6: Luftdurchlässigkeit von Außenwänden und Fenstern

Im Vergleich zu den untersuchten Gebäuden ist noch die Luftdurchlässigkeit von Fenstern mit einem Fugendurchlaßkoeffizienten $a = 1$ und $a = 2$, bezogen auf $1 m$ Fugenlänge, aufgetragen. Nimmt man an, daß bei einem Wohngebäude auf $1 m^2$ Außenwandfläche etwa $1 m$ Fugenlänge der Fenster kommt, so ist die Luftdurchlässigkeit der Außenwandfläche und der Fenster direkt vergleichbar. Man sieht, daß die gesamte Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes ungefähr derjenigen Luftdurchlässigkeit entspricht, wie sie durch Fenster mit einem Fugendurchlaßkoeffizienten a zwischen $1,3$ und $2,3$ bedingt ist.

Die Fugendurchlässigkeit der Fenster kann nicht als alleiniger Maßstab für die Beurteilung der Gebäudeun-

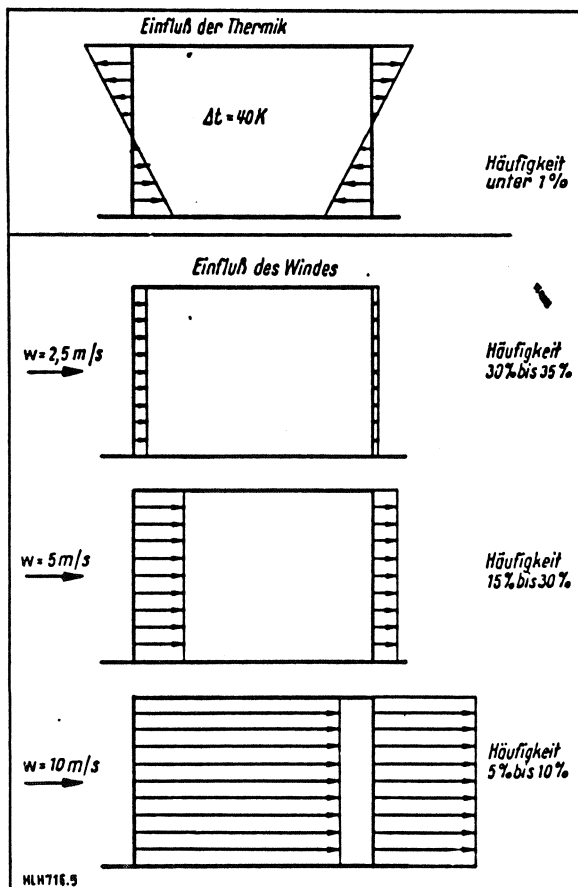


Bild 5: Vergleichende Gegenüberstellung der durch Wind und Thermik erzeugten Druckkräfte an einem 5geschossigen Gebäude

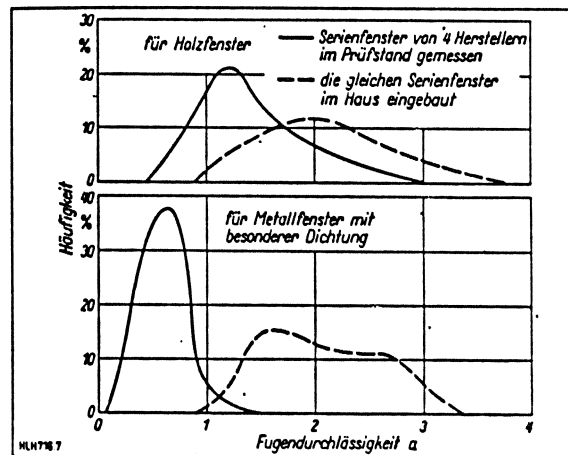


Bild 7: Streubereich der Fugendurchlässigkeit a

dichtheit herangezogen werden. Heute werden zum Teil Fenster mit einem Fugendurchlaßkoeffizienten von $a = 0,1$ angeboten. Der a -Wert stellt einen am Prüfstand ermittelten Wert dar, der sich aber im Lauf der Zeit durch die Benutzung des Fensters und durch Witterungseinflüsse verändern kann.

Von W. Schüle [3] sind Reihenuntersuchungen über die Dichtheit von Fenstern in nicht eingebautem und in eingebautem Zustand unter Einbeziehung der Anschlußstelle des Fensters an die Außenwand durchgeführt worden. Es sind sowohl Holz- als auch Metallfenster aus der Serienproduktion untersucht worden. Das Ergebnis ist auf Bild 7 dargestellt. Die Holzfenster wiesen im Prüfstand einen a -Wert zwischen $0,5$ und 3 auf. Der am häufigsten vorkommende Wert lag bei $1,2$. Der a -Wert der Metallfenster mit elastischer Dichtung lag zwischen $0,2$ und $1,5$, mit dem häufigsten Wert von $0,6$.

Nach dem Einbau ergaben sich unter Einbeziehung der Anschlußstellen der Fenster an die Wand eindeutig höhere Undichtheiten. Besonders deutlich ist dieser Unterschied bei den Metallfenstern, bei denen der mittlere a -Wert im Prüfstand etwa 0,6 betrug und im eingebauten Zustand auf 2 anstieg.

Luftwechsel nach DIN 4701

Der Lüftungswärmebedarf nach DIN 4701 errechnet sich zu:

$$Q_L = \Sigma (a \cdot \Delta \lambda \cdot R \cdot H \cdot \Delta t)$$

Darin bedeutet:

- a Durchlässigkeit je m Fugenlänge in m³/h bei 1 kg/m² Druckunterschied.
- l Fugenlänge der angeblasenen Fenster und Türen
- $\Sigma (a \Delta \lambda)$ Durchlässigkeit der angeblasenen Fenster und Türen
- R Raumkenngröße
- H Hauskenngröße
- Δt Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft

Der dem Lüftungswärmebedarf entsprechende Volumenstrom beträgt:

$$\dot{V}_L = \frac{Q_L}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta t}$$

$$\dot{V}_L = \frac{\Sigma (a \cdot \Delta \lambda \cdot R \cdot H)}{\rho \cdot c_p}$$

Für die einzelnen Räume einer etwa 70 m² großen Dreizimmer-Wohnung ergeben sich nach dieser Berechnungsart bei verschiedenen Fugendurchlaßkoeffizienten der Fenster die in der *Tabelle* aufgeführten Luftwechselzahlen.

Da für die Ermittlung des Lüftungswärmebedarfs nach DIN 4701 nicht die mittleren Windgeschwindigkeiten, sondern extreme Windverhältnisse zugrunde gelegt sind, stellen die nach diesem Verfahren ermittelten Luftwechselzahlen ebenfalls Extremwerte dar, wie sie nur an einigen Tagen im Jahr auftreten. In der übrigen Zeit wird der

Luftwechsel unter diesen Werten liegen, vorausgesetzt die Wohnungsfenster bleiben geschlossen.

In der Wärmeschutzverordnung zum Energieeinsparungsgesetz werden für Gebäude mit mehr als zwei Geschossen Fenster mit einem Fugendurchlaßkoeffizienten $a < 1$ gefordert. Andererseits soll in der Neuausgabe der DIN 4701 für den Lüftungswärmebedarf ein 0,5facher Mindestluftwechsel vorgeschrieben werden. Betrachtet man in dem angeführten Beispiel Fenster mit einem Fugendurchlaßkoeffizienten von $a = 0,5$, ergibt sich für jeden Raum ein Luftwechsel, der kleiner als 0,5 ist.

Luftwechselzahlen nach experimentellen Untersuchungen

Für die Auslegung der Heizanlage und der Heizkörper interessiert der Extremwert des Luftwechsels und der daraus resultierende Lüftungswärmebedarf. Der Hygieniker muß sich die Frage stellen, wie groß der Luftwechsel nicht nur unter extremen Witterungsbedingungen ist, sondern welche Luftwechselzahlen das ganze Jahr über erreicht werden.

Die ersten diesbezüglichen Untersuchungen wurden vor etwa 100 Jahren von *Max von Pettenkofer* durchgeführt [4]. Das Ergebnis seiner Messungen dient heute als Grundlage für die Beurteilung vieler Fragen der Raumlufttechnik. Die ersten Reihenuntersuchungen wurden 1932 von *P. Wellner* unternommen [5]. Um möglichst alle Einflüsse auf den Luftwechsel zu erfassen, wurden die

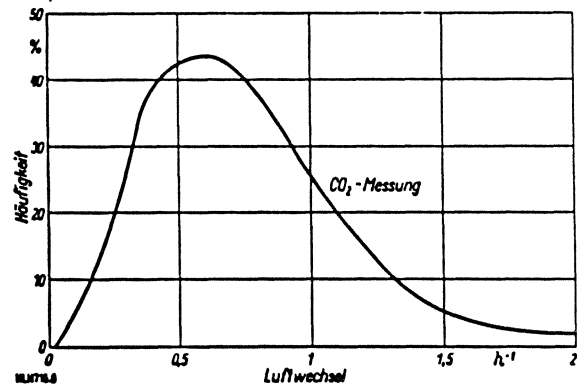


Bild 8: Häufigkeit des Luftwechsels nach Untersuchungen von P. Wellner

Tabelle: Luftwechselzahlen bei verschiedenen Fugendurchlaßkoeffizienten

Raum	Wohnfläche m ²	Raumvolumen m ³	Außenwandfläche m ²	Fensterfläche m ²	Fugenlänge m	Luftwechsel h ⁻¹ bei einer Fugendurchlässigkeit			
						a = 0,1	a = 0,5	a = 1	a = 2
Wohnzimmer	23,0	57,5	17,0	3,75	14	0,03	0,16	0,31	0,62
Küche	8,5	21,5	7,4	1,90	7,5	0,04	0,22	0,43	0,86
Schlafzimmer	12,5	31,0	10,0	2,90	11,5	0,06	0,30	0,61	1,20
Kinderzimmer	11,5	29,0	8,5	2,00	8	0,04	0,17	0,35	0,70
Bad/WC	5,0	12,5	4,5	1,00	5	0,05	0,23	0,46	0,93
Flur/Abst.R.	9,0	22,5	-	-	-	-	-	-	-
Summe:	69,5	174,0	47,5	11,55	45,5				

Die Hauskenngröße ist dabei mit $H = 0,41$ angesetzt. Die Hauskenngröße berücksichtigt die am Ort des Gebäudes herrschenden Windverhältnisse.

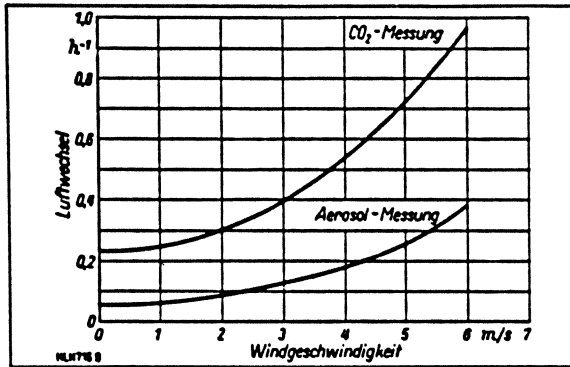


Bild 9: Abhängigkeit des Luftwechsels von der Windgeschwindigkeit Nach Messungen von Georgii

Versuche in einem Zeitraum von zwei Jahren zu verschiedenen Jahreszeiten bei verschiedenen Witterungsbedingungen und in verschiedenen ausgestatteten Wohnungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten nach der sogenannten Kohlendioxid-Methode. Dabei wird die Luft in dem zu untersuchenden Raum mit Kohlendioxid angereichert. Kommt es zu einem Austausch der Raumluft mit der Außenluft, so wird die CO₂-Konzentration im Versuchsraum allmählich abnehmen. Der Grad der Abnahme in einem bestimmten Zeitraum stellt ein Maß für die Größe des Luftwechsels dar. Am häufigsten tritt nach den Untersuchungen von Wellner ein 0,5- bis 0,6facher Luftwechsel auf (Bild 8).

1953 versuchte Georgii [6], eine Abhängigkeit des Luftwechsels von der Windgeschwindigkeit festzustellen. Das Ergebnis seiner Untersuchungen ist auf Bild 9 dargestellt. Die Messungen wurden auf zwei verschiedene Arten durchgeführt; einmal nach der vorgenannten CO₂-Methode, zum anderen auf die Art, daß das Kohlendioxid durch Aerosole ersetzt und deren Konzentrationsabnahme beobachtet wurde. Die Aerosol-Messungen ergaben dabei wesentlich geringere Luftwechselzahlen als die CO₂-Messungen. Georgii macht dafür die Eigenschaft der Gase, nahezu ungehindert durch die Kapillaröffnungen von Wänden und durch Undichtheiten diffundieren zu können, verantwortlich. Dieser Anteil des diffundierenden CO₂ täuscht einen höheren Luftwechsel vor, als er sich tatsächlich einstellt. Korrigiert man die von Wellner gefundene Häufigkeitsverteilung des Luftwechsels, so ergibt sich als häufigster Luftwechsel nicht mehr 0,6, sondern nur mehr 0,3.

In diesem Zusammenhang taucht die Frage auf, was Luftwechsel überhaupt heißt. Bedeutet es in jedem Fall einen Austausch von Raum- und Außenluft, oder wird bereits eine gewisse Lüfterneuerung dadurch herbeigeführt, daß einzelne Bestandteile der Luft durch Diffusion ausgetauscht werden, daß z.B. eine durch Personen bedingte erhöhte CO₂-Konzentration im Raum abgebaut wird, durch eine CO₂-Diffusion von innen nach außen, und andererseits eine niedrigere O₂-Konzentration im Raum eine Sauerstoffdiffusion von außen nach innen bewirkt? Man muß dabei jedoch berücksichtigen, daß es sich bei Diffusionsvorgängen um molekulare Vorgänge handelt, die nur mit geringer Geschwindigkeit ablaufen.

Mathematische Modelluntersuchungen Modellbeschreibung

Die Größe des Luftwechsels in Gebäuden hängt außer von den meteorologischen Bedingungen wie Wind und

Thermik auch von den baulichen Gegebenheiten ab. Wie bereits erwähnt, spielen dabei die Gebäudehöhe, die Dichtigkeit der äußeren und inneren Bauteile, die Grundrißgestaltung des Gebäudes und die Orientierung der Wohnungen eine Rolle. Außerdem können Entlüftungseinrichtungen, mit denen wegen der innenliegenden Sanitärräume die meisten neugebauten Wohnungen ausgestattet sind, einen entscheidenden Einfluß auf den Luftwechsel haben.

Unter gewissen Annahmen und Vereinfachungen läßt sich die Durchströmung jedes Gebäudes durch mathematische Gleichungen beschreiben. Dies sei an dem speziellen Fall eines mehrgeschossigen Wohnhauses, in dem der Einfluß der Thermik untersucht werden soll, näher erläutert (Bild 10). Dabei wurde davon ausgegangen, daß die Wohnungen mit Entlüftungsanlagen nach DIN 18017, Blatt 1, ausgestattet sind. Strömungswiderstände innerhalb der Wohnungen werden vernachlässigt. Jede Wohnung hat eine durch Undichtheiten bedingte Verbindung nach außen und zum Treppenhaus hin und über die Entlüftungsanlage eine weitere Verbindung nach außen. Das Treppenhaus hat ebenfalls äußere Undichtheiten.

Der Luftdurchgang durch die äußeren Undichtheiten eines Gebäudes kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\Delta p = W \cdot \dot{V}^{\nu^2}$$

Hierin ist

Δp Druckdifferenz in Pa

W Luftwiderstand in Pa/(m³/s)²

\dot{V} Volumenstrom in m³/s

Denkt man sich die gesamten äußeren Gebäudeundichtheiten in der Undichtheit der Fenster vereinigt, so läßt sich der Widerstand W aus deren Fugendurchlässigkeit und Fugenlänge berechnen.

$$W = \frac{9,81}{\left(\frac{a \cdot l}{3600}\right)^{\nu^2}}$$

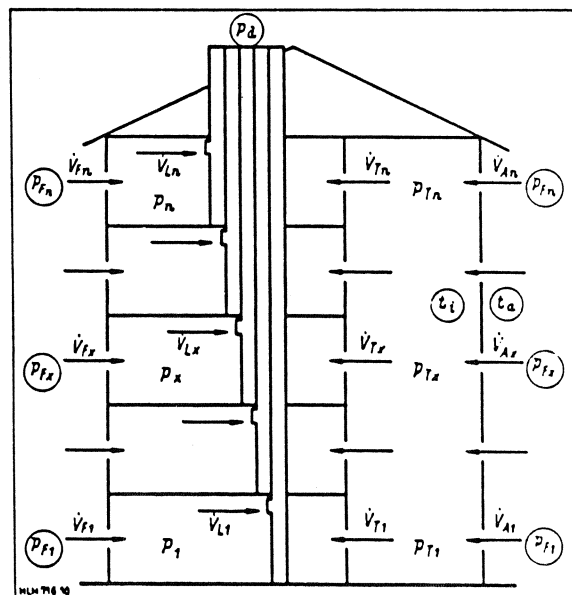


Bild 10: Strömungsmodell eines 5-geschossigen Wohnhauses zur Untersuchung der Thermik

mit

$$a \text{ Fugendurchlässigkeit in } \frac{\text{m}^3/\text{h}}{(\text{kp}/\text{m}^2)^{2/3} \cdot \text{m}}$$

l Fugenlänge in m

Bei bekannter äußerer Druckverteilung und bekannten äußeren und inneren Undichtheiten kann man für die verschiedenen Gebäudebereiche Volumenstrombilanzen aufstellen; innerhalb einer Wohnung oder im Treppenhaus müssen dabei die ein- und austretenden Volumenströme gleich groß sein.

Je nach den Druckverhältnissen stellt sich in einer Wohnung eine der sechs auf Bild 11 skizzierten Strö-

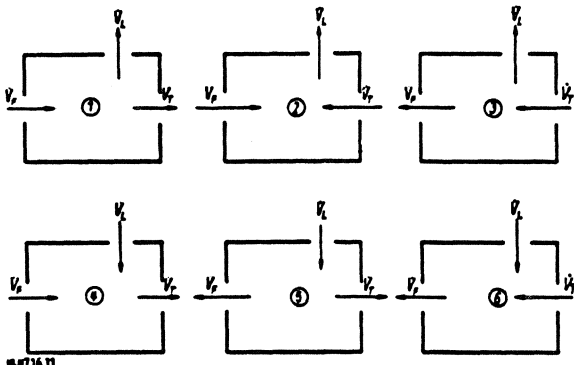


Bild 11: Strömungsmöglichkeiten innerhalb der Wohnung

mungsmöglichkeiten ein. Unter der Annahme, daß die Möglichkeit ① zutrifft, lautet die Volumenstrombilanz für die Wohnung des x -ten Geschosses

$$\dot{V}_{F_x} - \dot{V}_{T_x} - \dot{V}_{L_x} = 0; \quad (1)$$

mit

\dot{V}_F Volumenstrom durch die äußeren Undichtheiten (Fenster)

\dot{V}_T Volumenstrom durch die zum Treppenhaus führenden Undichtheiten

\dot{V}_L Volumenstrom der Entlüftungsanlage

Weiterhin ergibt sich:

$$\dot{V}_{F_x} = \left(\frac{p_{T_x} - p_x}{W_{F_x}} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$\dot{V}_{T_x} = \left(\frac{p_x - p_{T_x}}{W_{T_x}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

wobei

p_F Außendruck
 p_T Druck im Treppenhaus
 p Druck in der Wohnung
 W_F Luftwiderstand der Außenfenster $\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^{2/3}$
 W_T Luftwiderstand der Treppenhautür $\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^{2/3}$
 (Wand)

bedeutet.

Der Volumenstrom durch die Entlüftungsanlage ergibt sich aus der Bernoullischen Gleichung:

$$p_x - p_D - \frac{\rho_1}{2} W_L^2 \left[1 + \xi_v + (n+1-x) \frac{\lambda}{d} \cdot h \right] - (n+1-x) \rho_1 \cdot g \cdot h = 0;$$

mit

p_D Druck am Dach in Pa
 v Geschwindigkeit in der Entlüftungsleitung in m/s

ξ_v Verlustbeiwert des Abluftventils

d Durchmesser der Entlüftungsleitung in mm

n Anzahl der Geschosse

h Geschoßhöhe in m

ρ_1 Innere Dichte der Luft in kg/m^3

zu

$$\dot{V}_{L_x}^2 \frac{\rho_1 \cdot d^2 \pi^2}{2 \cdot 16} \left(1 + \xi_v + (n+1-x) \frac{\lambda}{d} \cdot h \right) - p_x + p_D + (n+1-x) \rho_1 \cdot g \cdot h = 0; \quad (4)$$

Damit ergibt sich aus den Gleichungen (1) bis (4)

$$\left(\frac{p_{T_x} - p_x}{W_{F_x}} \right)^{2/3} - \left(\frac{p_x - p_{T_x}}{W_{T_x}} \right)^{2/3} - \frac{\left(p_x - p_D - (n+1-x) \rho_1 \cdot g \cdot h \right)}{\left(\frac{\rho_1 \cdot d^2 \pi^2}{2 \cdot 16} (1 + \xi_v + (n+1-x) \frac{\lambda}{d} \cdot h) \right)} = 0; \quad (5)$$

Für die Wohnungen erhält man also n -Gleichungen mit den Unbekannten:

$$p_1 + p_n$$

$$p_{T1} + p_{Tn}$$

Die unbekannt Drücke im Treppenhaus $p_{T1} + p_{Tn}$ können folgendermaßen ermittelt werden:

Nimmt man die neutrale Zone, also die Zone mit Druckgleichheit zwischen außen und innen in halber Gebäudehöhe an, so ergibt sich im x -ten Geschöß theoretisch der Druck:

$$p_{T_x}(\text{theor.}) = (\rho_n - \rho_1) g \cdot h \cdot \left(x - 0,5 - \frac{n}{2} \right) \quad (6)$$

Es werden nun zwei Faktoren hinzugefügt, welche die theoretische Druckverteilung den tatsächlichen Gegebenheiten anpassen.

$$p_{T_x} = (\rho_n - \rho_1) g \cdot h \cdot \left(x - 0,5 - \frac{n}{2} \right) \cdot b + c \quad (7)$$

Der Faktor b berücksichtigt die inneren Widerstände des Treppenhauses. Er verändert die Steilheit der Druckkurve.

Nach Messungen von G. T. Tamura [1] liegt dieser Wert zwischen 0,7 und 1,0 (siehe auch Bild 4).

Der Faktor c verschiebt die Druckkurve nach oben oder unten. Er wird aus der Luftmengenbilanz des Treppenhauses ermittelt.

$$\sum_{x=1}^n \dot{V}_{A_x} - \sum_{x=1}^n \dot{V}_{T_x} = 0;$$

mit

\dot{V}_A Volumenstrom zwischen Treppenhaus und außen.

Für die Darstellung der Volumenströme \dot{V}_{A_x} und \dot{V}_{T_x} muß wieder für jedes Geschöß eine Fallunterscheidung vorgenommen werden, die die Strömungsrichtung der Luft berücksichtigt.

Ist

$$P_{T_1} < P_{F_1}$$

so gilt

$$\dot{V}_{A_1} = \left(\frac{P_{F_1} - P_{T_1}}{W_{A_1}} \right)^{2/3}$$

Ist

$$P_{T_1} > P_{F_1}$$

so gilt

$$\dot{V}_{A_1} = - \left(\frac{P_{T_1} - P_{F_1}}{W_{A_1}} \right)^{2/3}$$

Dabei ist

W_A Luftwiderstand der Treppenhausundichtheiten gegen außen

P_F Druck außerhalb des Treppenhauses

Für die Luftströmungen zwischen Treppenhaus und Wohnungen gilt die Fallunterscheidung entsprechend. Das vorgenannte Gleichungssystem kann iterativ gelöst werden.

Wesentlich komplizierter werden die Verhältnisse, wenn die Wohnungen mit ventilatorbetriebenen Zentralentlüftungsanlagen ausgerüstet sind. Da die angeschlossenen Wohnungen über die Entlüftungsanlage miteinander verbunden sind, beeinflussen sich die Druckverhältnisse der einzelnen Wohnungen gegenseitig. Dies muß bei den die Luftströmung beschreibenden Gleichungen berücksichtigt werden. Außerdem muß man die Art der Auslegung der Entlüftungsanlage (Minstdruckabfall am untersten Ventil und Ventilator Kennlinie) mit in die Überlegungen einbeziehen. Weitere Ausführungen hierzu sollen jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht gemacht werden.

Einfluß des Windes

Unter der Annahme einer für die gesamten Gebäudedichtheiten stellvertretenden Fugendurchlässigkeit der Fenster von $a = 2$ und einem Fensterflächenanteil von 25% errechnet sich für eine zweiseitig orientierte 70 m²-Wohnung der auf Bild 12 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit aufgetragene Luftwechsel. Der Luftwechsel ohne Entlüftungsanlage ist in der linken Bildhälfte eingetragen. Ist die Wohnung mit einer Entlüftungsanlage

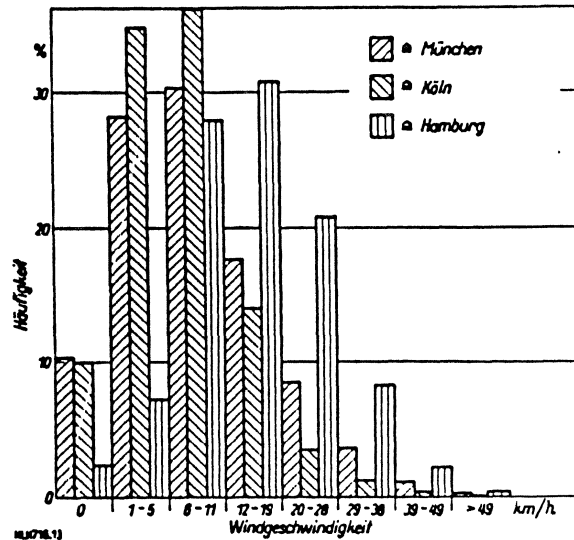
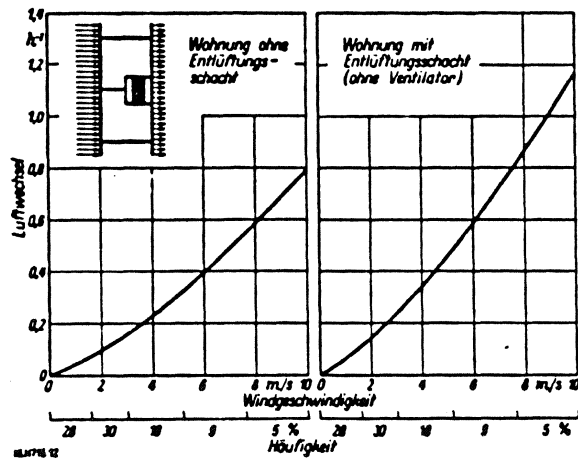


Bild 13: Häufigkeit verschiedener Windstärken für München, Köln und Hamburg

ohne Ventilator ausgestattet, so ergibt sich die auf der rechten Seite dargestellte Kurve. Durch die zusätzliche, über die Entlüftungsanlage nach außen gehende Verbindung stellt sich in dieser Wohnung ein etwas größerer Luftwechsel ein.

Die Windgeschwindigkeit ist örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen (Bild 13). Betrachtet man die Häufigkeit, mit der die einzelnen Windgeschwindigkeiten auftreten, so wird deutlich, daß der Luftwechsel zu 60% der Zeit nicht größer als 0,2fach ist, unabhängig davon, ob eine Entlüftungsanlage (ohne Ventilator) eingebaut ist oder nicht. Da bei den Berechnungen immer von geschlossenen Fenstern ausgegangen wird, darf als Betrachtungszeitraum nur die Heizperiode angesehen werden.

Natürlich läßt sich durch das Öffnen von Fenstern in der relativ windarmen Zeit ein höherer Luftwechsel erreichen. Aber wegen des damit verbundenen unkontrollierbar hohen Luftwechsels sollte das Fenster als Dauerlüftungseinrichtung während der Heizperiode ausscheiden.

Einfluß der Thermik

Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft bewirken während der kalten Jahreszeit ein Durchströ-

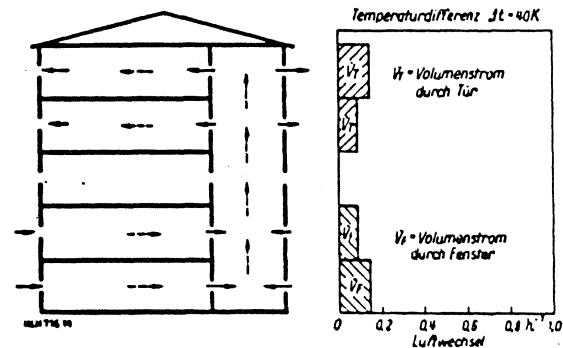


Bild 14: Einfluß der Thermik auf den Luftwechsel eines 3-geschossigen Wohnhauses ohne Entlüftungsanlage

Bild 12: Luftwechsel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in einer zweiseitig orientierten Wohnung

men von Luft durch das Gebäude von unten nach oben. In die unteren Wohnungen dringt kalte Außenluft ein, wird dort erwärmt, mischt sich mit der von außen in das Treppenhaus gelangten Luft und entweicht über die oberen Wohnungen und die Undichtheiten des Treppenhauses wieder ins Freie. Bei einer Temperaturdifferenz von 40 K bewegt sich die Luftwechselzahl in einem 5geschossigen Gebäude je nach Höhenlage der Wohnung zwischen 0 und 0,2 (Bild 14). Wesentlich höhere Luftwechselzahlen stellen sich ein, wenn die Wohnungen an einen Entlüftungsschacht angeschlossen sind (Bild 15).

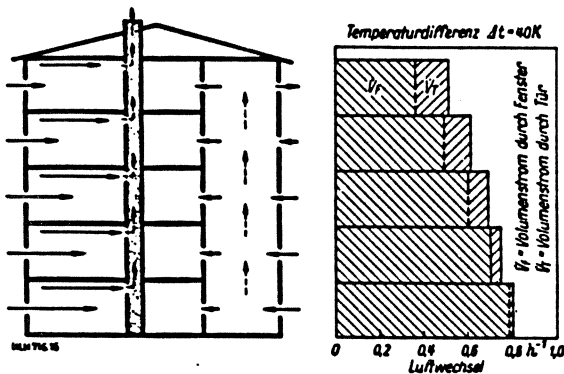


Bild 15: Einfluß der Thermik auf den Luftwechsel eines 5geschossigen Wohnhauses mit Entlüftungsanlage ohne Ventilator

Zusammenfassung

Durch die Senkung des Transmissionswärmebedarfs von Gebäuden infolge steigender Anforderungen an die Wärmedämmung entfällt auf den Lüftungswärmebedarf

ein immer größer werdender Anteil am gesamten Wärmebedarf. Der Lüftungswärmebedarf beeinflusst damit in verstärktem Maße die Auslegung und die regeltechnische Ausstattung der Heizanlage.

Die am Prüfstand ermittelte Fugendurchlässigkeit der Fenster kann nicht mehr als alleiniges Maß für die Undichtheit eines Gebäudes verwendet werden. Bei sehr dichten Fenstern wird die Luftdurchlässigkeit weitestgehend durch die übrigen Undichtheiten des Bauwerks bestimmt.

Bei „niedrigen“ Wohngebäuden liegt die Luftwechselzahl während der Heizperiode zu 60% der Zeit unter einem Wert von 0,2, vorausgesetzt man schließt das Fenster als Dauerlüftungseinrichtung aus.

Schließt man das Fenster wegen der unkontrollierbar hohen Energieverluste als Dauerlüftungseinrichtung aus, so ist es ohne ventilatorbetriebene Entlüftungsanlage oder Be- und Entlüftungsanlage nicht möglich, zu jeder Zeit in einer Wohnung einen „gewissen“ Minderluftwechsel einzuhalten.

Schrifttum

- [1] Tamura, G. T.: Pressure Differences for a Nine-storey Building as a Result of Chimney Effect and Ventilation System Operation. ASHRAE Transaction No 1973.
- [2] Shaw, C. J.: Air Leakage Measurements of the Exterior Walls of tall Buildings. ASHRAE Transaction No 2280.
- [3] Schüle, W.: Untersuchungen über die Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern. Gesundheits-Ingenieur (1962) S. 153/62.
- [4] v. Pettenkofer, M.: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München 1858.
- [5] Wellner, P.: Untersuchungen über die Größe des natürlichen Luftwechsels in Wohnungen älterer und neuerer Bauweise. Dissertation TH Dresden 1932.
- [6] Georgii, H. W.: Untersuchungen über den Luftaustausch zwischen Wohnräumen und Außenluft. Archiv f. Met., Geoph., Biokl. B 5 (1954) S. 191. [H 716]

Berechnung der Dicke der Wärmeschutzschicht von wärme-führenden Anlagen bei vorgegebener Oberflächentemperatur

Der Wärmeschutz von wärme-führenden Rohrleitungen usw., hat vornehmlich die Aufgabe, unerwünschte Energieverluste auf dem Weg zur Verbrauchsstelle so klein wie möglich zu halten. Häufig muß aber, wie M. Schneider¹⁾ ausführte, der Wärmeschutz auch noch anderen Anforderungen aus wirtschaftlichen, betriebstechnischen oder arbeitshygienischen Gründen genügen. So besteht z.B. oft die Auflage, daß die Oberflächentemperatur wärme-führender Anlagen in Arbeitsräumen im Bereich der Arbeitsplätze 45 °C nicht überschreiten darf. Es gilt somit für den Planungsingenieur, die Dicke der Wärmeschutzschicht auf der wärme-führenden Anlage bei vorgegebener Oberflächen-

temperatur zu berechnen. Diese Aufgabe läßt sich (wie es bisher auch im allgemeinen vorgenommen wurde) unter Verwendung der genauen Gleichungen für den Wärmeübergang an der Außenoberfläche und für den Wärmedurchgang (Zusammenhang zwischen den Wärmeverlusten und den Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und an der Außenoberfläche sowie den Dicken und den Wärmeleitfähigkeiten der Anlagenwand und der Isolierschichten) nur iterativ lösen. Bei diesem ziemlich aufwendigen Verfahren berechnet man mittels dieser beiden Gleichungen für eine geschätzte Isolierdicke die zugehörige Oberflächentemperatur und wiederholt die Rechnung so oft, bis sich für diese Temperatur der geforderte Wert ergibt.

M. Schneider zeigte nun, daß man sich die Iterationen ersparen kann, wenn man in der Wärmedurchgangs-

gleichung, was in der Praxis auch sehr häufig zutrifft, den Wärmeleitwiderstand des den Wärmeträger führenden Metallbehälters (z.B. ein Rohr oder ein flacher Kanal) gegenüber dem Wärmeleitwiderstand der Isolierschicht und ebenso den inneren Wärmeübergangswiderstand (Heißwasser, Warmwasser, Dampf) gegenüber dem äußeren (Raumluft) vernachlässigt. Das Verfahren wurde für die Wärmeisolation von ebenen Wänden und von Rohren anwendungsreif entwickelt. Bei der ebenen Wand erhält man die Dicke der Wärmeschutzschicht nach einer sehr einfachen Gleichung. Für das Rohr gestaltet sich die Rechnung unter Verwendung eines Hilfsdiagramms ähnlich einfach. Aus durchgerechneten Beispielen geht hervor, daß der durch die Vernachlässigungen entstehende Fehler vernachlässigbar klein ist.

Hah [H 705]

¹⁾ Schneider, M.: Berechnung der Isolierdicke auf der Grundlage einer vorgegebenen mittleren Oberflächentemperatur. Stadt- u. Gebäudetechn. JI (1977) Nr. 3. S. 81/83.