A061
AIC
1119
AIC
1742

ZUR BESTIMMUNG DES INFILTRATIONSAUSTAUSCHES IN EINFAMILIENHÄUSERN

Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem sich die Infiltration von Luft für ein Einfamilienhaus überschlägig bei gegebenen Witterungsbedingungen bestimmen läßt. Um die Berechnung durchführen zu können, muß lediglich die Durchlässigkeit der Außenhaut des Gebäudes mit Hilfe einer sogenannten Blowerdoor (s. *Bild 1*) gemessen werden. Das Rechenverfahren selbst ist so einfach, daß es auf einem programmierbaren Taschenrechner durchgeführt werden kann.

Dr.-Ing. Helmut E. Feustel,
Berkeley, Kalifornien, USA

Überblick

In der Bundesrepublik Deutschland leben etwa 55% der Bevölkerung in Einfamilienhäusern. Dieser Bevölkerungsanteil verbrauchte im Jahre 1982 etwa 68% der gesamten, zur Wohnraumbeheizung aufgebrachten Energie [1]. Auf die Jahresheizarbeit für Lüftung [2] kommt dabei ein Anteil, der, je nach Wärmedämmung des betrachteten Gebäudes, bei 30 bis 60% der Gesamt-Jahresheizarbeit liegt. Mit zunehmender Wärmedämmung steigt auch der Anteil der Jahresheizarbeit für Lüftung, da die Lüftungsverluste nicht, wie die Verluste infolge Transmission, beliebig verringert werden können.

Neben diesen Energieverbrauchsaspekten wird der Luftqualität im Gebäude zunehmend Beachtung geschenkt, da die Luftaustauschraten infolge der strengeren Anforderungen an die Fugendurchlässigkeit der einzelnen Außenbauteile seitens der Gebäudenormen (DIN 4701 [3] Wärmeschutzverordnung [4]) ständig geringer werden.

Um ein Modell zu entwickeln, mit dem die Luftdurchströmung von Einfamilienhäusern bestimmt werden kann, wurden am Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) die Durchlässigkeit und die Luftdurchströmung der Gebäudehülle von Wohnhäusern untersucht. Dabei wurden an über 100 Einfamilienhäusern entweder Spurengasmessungen zur Bestimmung des Infiltrationsaustausches und/oder statische Über- bzw. Unterdruckmessungen zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit durchgeführt.

Diese Arbeit wurde durch den Secretary for Conservation and Renewable Energy, Office of Building Energy Research and Development, Building System Division des US Department of Energy unter dem Kontrakt No. de-aco3-76sf00098 gefördert.

Physikalische Einflüsse auf den Luftaustausch

Die Luftdurchströmung von Gebäuden erfolgt infolge von Druckdifferenzen, die durch Windkräfte, thermischen Auftrieb und Raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) hervorgerufen werden. Die Höhe des Luftaustausches ist abhängig von der Durchlässigkeit und deren Verteilung auf der Gebäudehülle sowie den inneren Strömungswiderständen. Die Druckverteilung im Gebäude kann infolge des Benutzerverhaltens, z.B. durch Öffnen von Fenstern oder Türen, erheblich verändert werden.

Auf Gebäude, die sich in einem Strömungsfeld befinden, wirken aerodynamische Kräfte. Auf der dem Wind zugewandten Seite eines Gebäudes treten Überdrücke, an den Fassaden parallel zur Strömungsrichtung und an den Leeseiten Unterdrücke gegenüber der ungestörten Strömung auf. Die Druckverteilung um angeströmte Körper wird mit Hilfe von dimensionslosen Druckbeiwerten beschrieben, die das Verhältnis der gemessenen statischen Druckdifferenz zum dynamischen Druck des Windes darstellen:

$$c_i\,(x, y, z, \Phi) = \frac{p_i\,(x, y, z) - p_0\,(z)}{p_{dyn}\,(z)} \qquad (1).$$

Hierin bedeuten:

c_i Druckbeiwert für Flächenelement i
p_i Druck auf das Flächenelement i
p_0 atmosphärischer Druck
p_{dyn} dynamischer Druck in der ungestörten Strömung } in Pa
x, y, z Koordinaten
Φ Anströmwinkel in °.

Für die Winddruckverteilung an einem Gebäude ergibt sich damit

$$p_i\,(x, y, z) - p_0\,(z) = p_{dyn}\,(z)\,c_i\,(x, y, z, \Phi) \qquad (2).$$

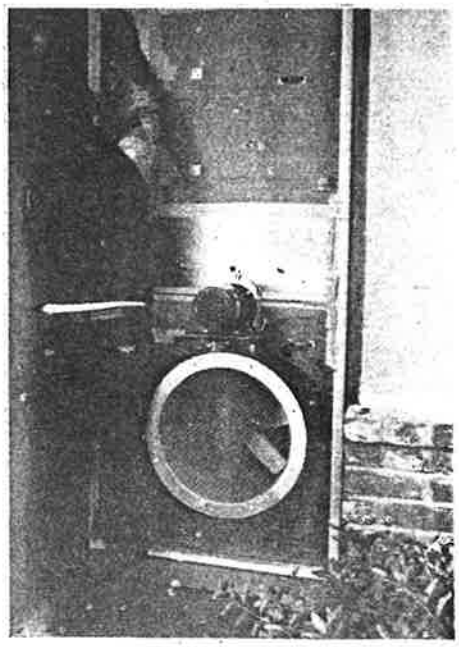

Bild 1: Blowerdoor, ein in ein Türblatt integrierter Ventilator, mit dessen Hilfe ein Über- oder Unterdruck innerhalb des Gebäudes gegenüber dem Umgebungsdruck aufgebaut wird

Dichteunterschiede infolge unterschiedlicher Temperaturen der Luftsäulen innerhalb und außerhalb des Gebäudes führen zu zusätzlichen Druckdifferenzen. Das thermische Druckgefälle innerhalb eines vertikalen Schachtes ist linear von der Differenz der Dichten der Luftsäulen abhängig. Die Absolutwerte des thermischen Druckes hängen zusätzlich von der Öffnungsverteilung der Gebäudehülle ab, die auch die Höhe der neutralen Zone (NPL = Neutral Pressure Level) bei Windstille bestimmt. Für die Steigung des Druckgefälles in einem vertikalen Schacht infolge von Temperaturdifferenzen gilt:

$$\frac{d(p_i - p_a)_{th}}{dz} = g\,(\varrho_a - \varrho_i) \quad (3).$$

Hierin bedeuten:

$(p_i - p_a)_{th}$ thermischer Differenzdruck in Pa
g Erdbeschleunigung in m s^{-2}
ϱ Dichte der Luft in kg m^{-3}
i innen
a außen.

Infolge der Widerstandsverteilung in den durchgehenden senkrechten Verbindungen eines Gebäudes können die thermischen Druckdifferenzen sehr unterschiedliche Werte annehmen [5].

Einen zusätzlichen, nicht unwesentlichen Einfluß auf die Druckverteilung in einem Gebäude stellen die RLT-Anlagen dar. Einerseits bewirken sie eine zu den Verkehrswegen des Gebäudes zusätzliche Koppelung der Räume untereinander, zum anderen stellen sie durch das Kanalnetz eine weitere Verbindung zwischen den einzelnen Räumen und dem äußeren Druckfeld her. Abhängig von der Auslegung des Kanalnetzes, der Ventilatorenkennlinie und dem Verhältnis der natürlichen zur maschinellen Lüftung wirken sich Änderungen der Außendrücke auf die Innendruckverteilung aus [6].

Beurteilung der Durchlässigkeit der Gebäudehülle

Der Druckabfall, der durch Strömung an einem unendlich tiefen Spalt mit gleichbleibendem Querschnitt auftritt, kann analog zu dem Druckabfall der Rohrströmung bestimmt werden. Die Beziehung zwischen dem Luftvolumenstrom und der treibenden Druckdifferenz wird aber in der Regel in Form des folgenden, empirisch gefundenen Potenzansatzes ausgedrückt [7 bis 9]:

$$\dot{V} = D\,(p_1 - p_2)^n \quad (4).$$

Hierin bedeuten:

$\dot{V}$ Volumenstrom in m^3 h^{-1}
D Durchlässigkeit in m^3 h^{-1} Pa^{-n}
$(p_1 - p_2)$ Druckdifferenz über die Bauteildicke in Pa
n Exponent des Differenzdruckes.

Der Wert des Exponenten liegt zwischen den beiden Grenzwerten, die durch vollkommen turbulente Strömung ($n = 0{,}5$) und vollkommen laminare Strömung ($n = 1{,}0$) gegeben sind. Infolge der mit dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit proportionalen Ein- und Austrittsverluste kann der Exponent selbst bei völlig laminarer Strömung im Spalt praktisch nicht den Wert $n = 1{,}0$ annehmen. Messungen der Luftdurchlässigkeit von Fenstern haben übereinstimmend den Wert $n = 0{,}66$ für den Exponenten bestätigt [5; 9; 10; 11]. Messungen von über fünfhundert Einfamilienhäusern in den USA und in Kanada ergaben für den Exponenten der Gesamtdurchlässigkeit der Gebäudehülle einen Mittelwert für die Gauß'sche Verteilungskurve, der in der gleichen Größenordnung liegt, wie der für die Einzelbauteile [12].

Holzhäuser, wie sie vorwiegend in den Vereinigten Staaten von Amerika und in Kanada als Einfamilienhäuser anzutreffen sind, besitzen einen hohen Anteil an Hintergrunddurchlässigkeit, die durch poröses Baumaterial, Risse und Spalte verursacht wird und als gleichmäßig über die Gebäudehülle verteilt angesehen werden kann. Die einzelnen Bauteilfugen spielen bei der Bestimmung der Gesamtdurchlässigkeit hierbei nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Luftdurchlässigkeit von Steinhäusern dagegen wird, sachgemäße Verarbeitung vorausgesetzt, vorwiegend von den Fugen der Einzelbauteile, wie Fenster und Türen und deren Anschlußfugen, bestimmt. Deren gleichmäßige Verteilung über die Gebäudehülle ist nicht zwingend gegeben.

Um eine Abschätzung der natürlichen Lüftung vorzunehmen, ist es notwendig, die Durchlässigkeit der Außenhülle zu bestimmen. Dazu bieten sich verschiedene Methoden an, die bezüglich ihrer Genauigkeit unterschiedlich zu bewerten sind. Die in Deutschland wohl bekannteste Methode wird in DIN 4701 [3] beschrieben. Ähnlich wie in der Fugenlängenmethode, die lange Zeit als Standardmethode von ASHRAE [13] vorgeschlagen wurde, werden hier nur die Bauteile selbst bewertet. In Schweden entwickelte man in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre ein Meßverfahren, das die Gesamtdurchlässigkeit des Gebäudes wiedergibt. Dazu wird dem zu untersuchenden Gebäude ein Über- oder Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck aufgeprägt und der dazu notwendige Luftmassenstrom bestimmt. Dieses Meßverfahren, das in der Regel zur Bestimmung der Durchlässigkeit der Außenhaut von Einfamilienhäusern Anwendung findet, wird als statisches Über- bzw. Unterdruckverfahren (DC-pressurization) bezeichnet. In verschiedenen Ländern sind diese Meßverfahren bereits genormt, so z.B. in Schweden [14], Norwegen [15], USA [16] und Kanada [17]. Der Differenzdruck wird mit Hilfe eines in die Fassade eingebauten Ventilators aufgebracht. Um Beschädigungen der Außenhaut zu vermeiden, wird der Ventilator in der Regel in einem Türblatt integriert, das für die Messungen anstelle der Originaltür in den Türrahmen eingebaut wird (Blowerdoor, siehe auch *Bild 1*). Gemessen wird hierbei der geförderte Luftvolumenstrom bei einer vorgegebenen Druckdifferenz. Um Fehler infolge Windangriff oder thermischen Druckdifferenzen auszuschließen, sollten sowohl Windstille als auch etwa gleiche Lufttemperaturen innen und außen als Randbedingungen vorliegen. Die vorstehend genannten Meßnormen geben unterschiedliche Grenzwerte für noch zulässige Witterungsbedingungen an und beschreiben unterschiedliche Meßprozeduren. Neben den vier Ländern, in denen bereits eine Norm über die statischen Verfahren vorliegt, verwenden einige Mitgliedsländer des Air Infiltration Centre (AIC) [18] diese Meßverfahren, auch wenn für diese Länder noch keine Norm über deren Anwendung vorhanden ist.

Mit der oben beschriebenen Methode läßt sich die Durchlässigkeitsverteilung der Außenhaut dadurch ermitteln, daß man einige Bauteile mit einer Folie abdichtet und damit deren Anteil an der Gesamtdurchlässigkeit bestimmt [19]. Um sowohl den Fugendurchlaßkoeffizienten als auch den Exponenten des Differenzdruckes ermitteln zu können, wird das Meßverfahren für verschiedene Druckdifferenzen durchgeführt. Aus der sich ergebenden Kennlinie lassen sich mit Hilfe einer Regressionsrechnung die beiden gesuchten Kennwerte bestimmen. Windangriff und thermische Druckdifferenzen verfälschen das Ergebnis derart, daß auch Druckexponenten von $n < 0{,}5$ oder $n > 1{,}0$ auftreten können. Besonders signifikant sind die Unterschiede, die bei Windangriff für den Wechsel von Über- zu Unterdruckmessungen auftreten. Während geringe Unterschiede zwischen den ermittelten Druckexponenten infolge von unterschiedlicher Strömungsrichtung vorhanden sein können, sind den Werten, die die Grenzwerte überschreiten, besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

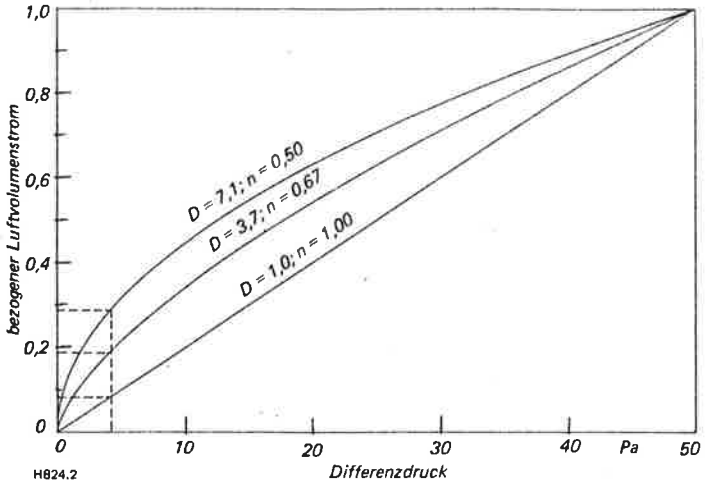

Bild 2: Sperrluftstrom, bezogen auf den Luftstrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa für verschiedene Kombinationen von Durchlässigkeit und Exponent des Differenzdruckes
s. Gl. (4)

Blowerdoormessungen werden, außer zur Bestimmung von strömungstechnischen Kennwerten, auch zur Bewertung der Dichtheit der Außenhaut eingesetzt. Dafür wird dem Gebäude ein relativer, positiver oder negativer Differenzdruck von 50 Pa aufgeprägt und der dafür notwendige Luftmassenstrom ermittelt [20]. Dieses Verfahren wird weltweit zum Vergleich der Gebäudedichtheit verwendet. Vorschläge, aus dem für die Druckaufprägung notwendigen Luftmassenstrom die Infiltrationsrate zu bestimmen, wurden an der Princeton University entwickelt [21]. Da jedoch verschiedene Kombinationen von Durchlässigkeit und Differenzdruckexponent zu gleichem Luftmassenstrom bei einer vorgegebenen Druckdifferenz führen können, ist dieser Kennwert nicht geeignet, verläßliche Aussagen über den zu erwartenden Infiltrationsaustausch zu erhalten, wie *Bild 2* verdeutlicht. In dem Druckbereich, in dem über lange Zeit des Jahres der Luftaustausch stattfindet, ergeben sich für Simulationsrechnungen infolge der unterschiedlichen Kennwerte erhebliche Abweichungen von der Realität. Um welchen Differenzdruckbereich es sich dabei handelt, ist allerdings umstritten; in den USA werden den Berechnungen Differenzdrücke von 4 Pa zugrunde gelegt; in Kanada dagegen von 10 Pa.

Die hohen Dichtigkeitsanforderungen, wie sie z.B. in Schweden oder Kanada bereits bestehen, führten zu einer weiteren Anwendung der Blowerdoor. So werden vielfach Überdruckmessungen bereits bei der Erstellung der Gebäude vorgenommen, um Undichtigkeiten, z.B. von Wasserdampfsperren, schon im Einbaustadium mit Hilfe von Rauchpatronen aufzuspüren.

Rechenmodelle zur Bestimmung des Infiltrationsaustausches

Die Bestimmung des Luftaustausches von Gebäuden beschäftigt seit geraumer Zeit Wissenschaftler an verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen. Die vorhandenen Rechenmodelle lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Empirische Modelle
- Einkammer-Modelle (single-cell models)
- Mehrkammer-Modelle (multichamber models).

Die empirischen Modelle sind wegen der Komplexität der physikalischen Gesetze auf den Luftaustausch nur auf Einfamilienhäuser anwendbar [22]. Die Unsicherheiten, die sich infolge von Umgebungsbebauungen, Abschirmeffekten und Benutzerverhalten ergeben, werden in die Regressionskoeffizienten verlagert. Deshalb können für vergleichbare Häuser Koeffizienten auftreten, die um den Faktor 20 voneinander abweichen. Häuser, für die keine Meßwerte vorliegen, können deshalb nur unter Vorbehalt simuliert werden.

In einer Studie des Air Infiltration Centre [23] wurden u.a. verschiedene Einkammer-Rechenmodelle vorgestellt. Die Untersuchung zeigt die große Bandbreite an unterschiedlichen Simulationstechniken der vorhandenen Rechenmodelle auf. Die all diesen Modellen anhaftende Schwäche ist, daß sich mit ihnen nur Strukturen berechnen lassen, in denen ein einheitlicher interner Druck angenommen werden kann. Damit ist die Simulation von Gebäuden, bei denen infolge interner Widerstände der Druck nicht mehr als konstant angenommen werden kann, oder bei denen vertikale Schächte vorhanden sind, nicht möglich [24].

Mehrkammer-Modelle behandeln die komplexen Zusammenhänge von Strömungen in Gebäuden sehr viel realistischer. Dafür benötigen sie eine Vielzahl von Informationen über interne und externe Strömungswiderstände sowie die externen Druckprofile. Fünfzehn solcher Modelle, die zwischen 1966 und 1983 entwickelt wurden, sind in einer Studie zusammengefaßt, die kürzlich am Lawrence Berkeley Laboratory zusammengestellt wurde [25]. Der Vorteil dieser Modelle liegt in der Möglichkeit, genaue Kenntnis über die internen Luftaustauschvorgänge, die für den Austausch von Gerüchen, Abgasen, Partikeln und im Brandfalle von Rauch verantwortlich sind, zu erhalten. Demgegenüber sind diese Programme in der Regel zu eingabeintensiv, um sinnvoll für Einfamilienhäuser angewandt zu werden.

Das LBL-Modell

Das LBL-Modell, erstmals im Jahre 1980 vorgestellt, wurde entwickelt, um die Nachteile der vorher genannten Mehrkammer-Modelle zu vermeiden [26]. Dieses Rechenmodell, das den Einkammer-Modellen zuzuordnen ist, benötigt die Durchlässigkeit und die Geometrie des Gebäudes, die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, die Windgeschwindigkeit und die Umgebungsbedingungen als Eingabewerte.

Der Widerstand des Gebäudes gegen die Luftdurchströmung wird mittels eines einzigen Parameters, der effektiven Durchlässigkeit (effective leakage area), ausgedrückt. Die Definition der effektiven Durchlässigkeit wird von der Blendenströmung her abgeleitet:

$$\dot{V} = L \left[\frac{2}{\varrho} (p_1 - p_2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

mit

$\dot{V}$ Volumenstrom in $m^3\,s^{-1}$
L effektive Durchlässigkeit in m^2
ϱ Dichte der Luft in $kg\,m^{-3}$
$(p_1 - p_2)$ Druckdifferenz über die Bauteildicke in Pa.

Diese Annahme geht davon aus, daß der Strömungswiderstand der Gebäudehülle hauptsächlich von den Ein- und Austrittsverlusten bestimmt wird und die Reibungsverluste innerhalb der Spalte vernachlässigbar gering sind. Die effektive Durchlässigkeit wird mit Hilfe von statischen Über- und Unterdruckmessungen gewonnen und als empirisches Verhältnis wie folgt dargestellt:

$$\dot{V} \approx L \left[\frac{2\,(p_1 - p_2)_r}{\varrho} \right]^{1/2} \left[\frac{(p_1 - p_2)}{(p_1 - p_2)_r} \right]^n \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

$(p_1 - p_2)$ gemessene Druckdifferenz in Pa
$(p_1 - p_2)_r$ Referenzdruckdifferenz, hier 4 Pa
n Exponent der Druckdifferenz.

Obwohl diese Annahme im Gegensatz zu den vorhergehend dargestellten Erkenntnissen über den Exponenten des Differenzdruckes steht, wird die Handhabung der Ermittlung der Luftdurchströmung dadurch erheblich vereinfacht. Da die Drücke, die die Luftdurchströmung durch ein Gebäude verursachen, für Einfamilienhäuser in einem begrenzten Bereich (zwischen 1 und 10 Pa) liegen, verringern sich die Fehler der Quadratwurzelannahme (s. Gl. (6)) deutlich, wenn man den Referenzdruck nahe der Mitte des Bereiches ansiedelt [27]. Weiterhin bekommt die effektive Durchlässigkeit dadurch eine physikalische Bedeutung: Die effektive Durchlässigkeit der Gebäudehülle kann als die Fläche verstanden werden, durch die bei einem Druck von 4 Pa (Referenzdruck für die USA) die gleiche Luftmenge strömt wie durch die Summe aller Einzeldurchlässigkeiten des Gebäudes [28].

Die Berechnung des Infiltrationsaustausches wird getrennt für Wind- und Temperatureinflüsse vorgenommen. Die Infiltration für die beiden Einflüsse gemeinsam ergibt sich mit dieser Annahme zu

$$\dot{V} = L\,[\underbrace{f_t^2\,(T_i - T_a)}_{\text{Auftriebseinfluß}} + \underbrace{f_v^2\,v^2}_{\text{Windeinfluß}}]^{1/2} \qquad (7).$$

Hierin bedeuten:

$(T_i - T_a)$ Temperaturdifferenz innen/außen in K
f_t Temperaturparameter in $m\,s^{-1}\,K^{-1/2}$
f_v Windparameter
v Windgeschwindigkeit in ms^{-1}.

In dieser Darstellung werden sowohl der Windanteil als auch der Temperaturanteil in Form eines äquivalenten Druckes über der Bauteildicke ausgedrückt. Die Terme unter der Quadratwurzel haben die Dimension einer quadratischen Geschwindigkeit, was einem Quotienten aus Druck und Dichte entspricht (s. auch Gl. (5)) [29]. Die Parameter sind wetterunabhängig und werden nur von der Verteilung der Durchlässigkeiten sowie der Abschirmung infolge Umgebungsbebauung beeinflußt. Für die Bestimmung der beiden Parameter werden, um die Gleichungen handlich zu halten, noch zwei Verhältniszahlen für die Durchlässigkeitsverteilung definiert:

$$R = \frac{L_d + L_f}{L} \qquad (8)$$

$$X = \frac{L_d - L_f}{L} \qquad (9),$$

mit

L_d effektive Durchlässigkeit der Decke
L_f effektive Durchlässigkeit des Fußbodens
L gesamte effektive Durchlässigkeit der Gebäudehülle

} in m^2

(Für Steinhäuser sind beide Verhältniszahlen in der Regel sehr klein.)

Der Temperaturparameter läßt sich, unter Zuhilfenahme der beiden vorstehend eingeführten Verhältniszahlen, wie folgt ausdrücken:

$$f_t = \frac{1}{3}\left(1 + \frac{R}{2}\right)\left[1 - \frac{X^2}{(2-R)^2}\right]^{3/2}\left[\frac{g\,H_s}{T_i}\right]^{1/2} \qquad (10).$$

Hierin bedeutet
H_s Höhendifferenz zwischen der niedrigsten und höchsten Leckagestelle des Gebäudes in m.

Der Windparameter wird durch die Durchlässigkeit der vertikalen Umschließungsflächen, dem Abschirmfaktor C' und dem Verhältnis der Windprofile an dem Standort des Hauses und dem Standort der Wetterstation gegeben:

$$f_v = C'\,(1 - R)^{1/3}\left[\frac{k_h\,(H_h/10)^{m_h}}{k_m\,(H_m/10)^{m_m}}\right] \qquad (11).$$

Hierin bedeuten:

C' Abschirmfaktor [—]
k, m Terrainkonstanten
H_h Gebäudehöhe bis zur obersten Decke
H_m Höhe, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird

} in m

Index h Ort, an dem sich das zu simulierende Gebäude befindet
Index m Ort, an dem die Windmessungen durchgeführt werden.

(Werte für C', k und m siehe *Tabelle 1 und 2.*)

Damit ist ein Rechenmodell gegeben, das auf fast jedem programmierbaren Taschenrechner implementiert werden kann.

Überprüfung der Gültigkeit

Die Überprüfung des Rechenmodells fand unter anderem mit Hilfe der „Mobile Infiltration Test Unit" (MITU) statt. MITU ist ein auf dem Markt erhältlicher Bürotrailer *(Bild 3)*, der zum Zweck der Luftwechselmessungen in ein fahrbares Labor umgebaut wurde. Mit Hilfe austauschbarer Elemente lassen sich unterschiedliche Durchlässigkeiten der Gebäudehülle darstellen. Um die Hintergrunddurchlässigkeit zu minimieren, wurde der Aufbau mit einer durchgehenden Wasserdampfsperre ausgekleidet; die Verbindungen wurden mit Silikondichtmittel abgedichtet [30].

Eine detaillierte Überprüfung des Modells anhand von MITU-Meßwerten für zwei Winter in Reno/Nevada zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Rechen- und Meßwerten [26]. Einzig für den Fall, daß die Infiltration infolge thermischer Auftriebskräfte und die infolge von Windkräften etwa gleich groß sind, zeigt das Modell einige Schwächen. Die Auswertung der simulierten Werte zeigt, daß die Gesamtdurchströmung etwa dem Volumenstrom des jeweils größeren Einflusses entspricht. Sind die Einflüsse von gleicher Größenordnung, so

Tabelle 1: Terrainkonstanten [32]

Terrainklasse	m	k	Beschreibung
I	1,30	0,10	Meeresoberfläche, mindestens fünf Kilometer vom Land entfernt
II	1,00	0,15	Flache Ebene mit nur vereinzelten Strömungshindernissen
III	0,85	0,20	Freie Ebene mit Häusern geringer Höhe oder geringem Baumbestand
IV	0,67	0,25	Siedlungen, Wälder, Industrie
V	0,47	0,35	Stadtmitte großer Städte

Tabelle 2: Abschirmfaktor [32]

Abschirmklasse	C'	Beschreibung
I	0,324	keine Abschirmung vorhanden
II	0,285	geringe lokale Abschirmung, z.B. durch einzelne Bäume
III	0,240	mittlere Abschirmung durch Hecken oder nahestehende Gebäude im Bereich von weniger als zwei Haushöhen entfernt
IV	0,185	dichte Abschirmung im Bereich von fünf Haushöhen für die Mehrzahl der Fassaden
V	0,102	sehr dichte Abschirmung durch große Gebäude, typische innerstädtische Bebauung

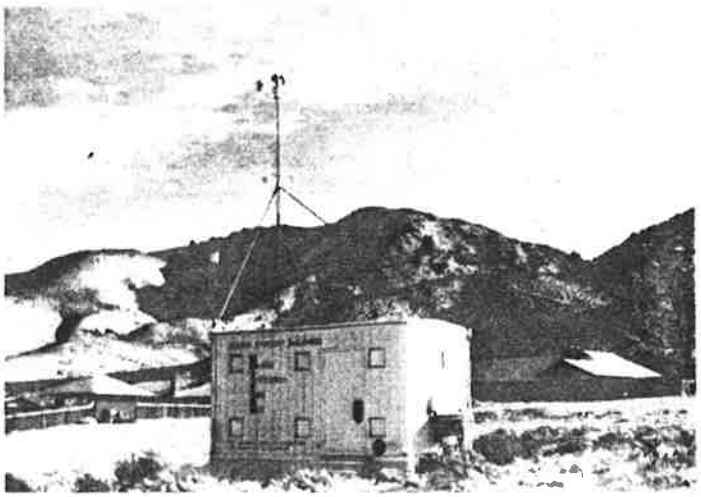

Bild 3: Mobile Infiltration Test Unit (MITU) in Reno, Nevada

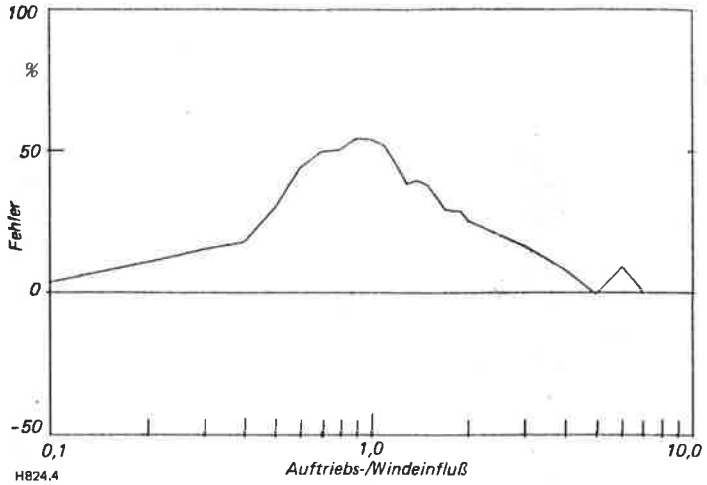

Bild 4: Fehler zwischen in MITU gemessener Infiltration und Ergebnissen des LBL-Modells

beträgt der Infiltrationsaustausch etwa 124% des Austausches, der nur bei einer Einflußgröße herrschen würde [31]. Mit der vereinfachenden Annahme der Quadratur der Einzelvolumenströme (s. Gl. (7)) ergibt sich aber eine Differenz von 41% zu dem des Einzeleinflusses. Demzufolge liegen die errechneten Werte für diesen Fall stets über den gemessenen Infiltrationswerten.

Für einen 873 Halbstundenmittelwerte umfassenden Datensatz von MITU-Messungen (Reno/Nevada) ergeben sich die in *Bild 4* dargestellten mittleren Fehlerabweichungen vom Meßwert. Dabei ist zu beachten, daß die Zahl der Ereignisse, bei denen Auftriebs- und Windeinflüsse in der gleichen Größenordnung liegen, auf das Jahr verteilt sehr gering sind. Die Abweichungen sind ausnahmslos positiv, d.h., die Luftmassenströme können, mit einem Korrekturfaktor versehen, den Meßwerten angepaßt werden. Vergleiche zwischen Meßwerten für MITU und Häusern in Kanada mit den Rechenwerten müssen noch zeigen, ob ein für alle Strukturen gültiger Korrekturfaktor gefunden werden kann.

Zusammenfassung

Vorgestellt wurden eine Meßmethode zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit und ein Rechenmodell zur Bestimmung des Infiltrationsaustausches von Einfamilienhäusern. Während es sich bei der Luftdurchlässigkeitsbestimmung um ein Verfahren handelt, das international angewandt wird, finden Rechenmodelle, wie das hier beschriebene, außerhalb der USA bislang nur vereinzelt Anwendung.

In einer vergleichenden Studie des AIC [23] erreichte das beschriebene Rechenmodell für alle untersuchten Häuser das beste Ergebnis aller Einkammer-Modelle. Besonders der einfache Algorithmus und die wenigen Eingabedaten prädestinieren dieses Modell, als Grundlage einer Standardrechenvorschrift für den Infiltrationsaustausch zu dienen.

Schrifttum

[1] *Schipper, L.*: Residential Energy Use The OECD, The Bottom-Up Approach. ACEEE 1984 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Tagungsband Nr. J (1984).
[2] *Feustel, H. E.*: Beitrag zur theoretischen Beschreibung der Druck- und Luftmassenstromverteilung in natürlich und maschinell gelüfteten Gebäuden. Fortschritt-Bericht der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 151 (1984).
[3] DIN 4701; Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Ausg. 1983.
[4] Verordnung über einen energieeinsparenden Wärmeschutz bei Gebäuden. BGBl Bundes-Gesetz-Blatt (1980) S. 701
[5] *Esdorn, H.*: Luftdurchlässigkeit der Fenster und Druckverteilung im Gebäude. In: Das Hochhaus der BASF „Planung, Ausführung, Erfahrungen". J. Hoffmann, Stuttgart (1958).
[6] *Feustel, H. E., u. H. Esdorn*: Mass Flow Distribution in High-Rise Buildings with Forced Ventilation Systems. Tagungsband der „International Conference on System Simulations in Buildings", Liege (1982).
[7] *Hopkins, L. P., u. B. Hansford*: Air Flow through Cracks. BSE Building Services Engineer 42 (1974), Nr. 9, S. 123/31.
[8] *Raisch, E.*: Die Wärme- und Luftdurchlässigkeit von Fenstern verschiedener Konstruktion. Gesundheits-Ingenieur 45 (1922) S. 99/105.
[9] *Reiher, H., K. Fraass u. E. Settle*: Über die Frage der Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern. 1. Teilbericht, Wärmewirtschaftliche Nachrichten 6 (1932/1933) S. 42/52 u. S. 55/59.
[10] *Schüle, W.*: Untersuchung über die Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern. Gesundheits-Ingenieur 83 (1962) Nr. 6, S. 153/62.
[12] *Sherman, M. H., D. J. Wilson u. D. E. Kiel*: Variability in Residential Air Leakage. Tagungsband „Symposium on Measured Air Leakage Performance of Buildings". ASTM, Philadelphia (1984).
[13] ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 21, Natural Ventilation and Infiltration (1977).
[14] Svensk Standard SS 02 15 51, SIS — Fastaeller och utger Svensk Standard Samt Saeljer Nationella och Internationella Standardpublikationer.
[15] Airtightness of Buildings. Test Method Norwegian Standard NS 8200, Norwegian Council of Building Standardization (1981).
[16] ASTM E 799-81: Measuring Air Leakage by the Fan-Pressurization Method. ASTM Committee E-6 on Performance of Building Con· 'ructions. Philadelphia (1981).
[17] Standard for Determination of Airtightness of Buildings by the Fan Pressurization Method. Canadian General Standards Board. Draft Version (1983).
[18] *Wolf, A.*: AIC — Nein Danke. CCI Clima Commerce International (1983) Nr. 11, S. 2.
[19] *Caffey, G. E.*: Residential Air Infiltration. Texas Power and Light Co. (1977).
[20] *Feustel, H. E.*: Forschung im Bereich der Wohnungslüftung. CCI Clima Commerce International 33 (1980) Nr. 11, S. 33/36.
[21] *Persily, A. K.*: Understanding Air Infiltration in Homes. Dissertation, Princeton University Center for Energy and Environmental Studies (1982).
[22] *Ross, H. D., u. D. T. Grimsrud*: Air Infiltration in Buildings: Literature Survey and proposed Research Agenda. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7822 (1978).
[23] *Liddament, M., u. C. Allen*: The Validation and Comparison of Mathematical Models of Air Infiltration. Technical Note AIC 11 (1983).
[24] ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 22, Natural Ventilation and Infiltration (1985).
[25] *Feustel, H. E., u. V. M. Kendon*: Infiltration Models for Multicellular Structures — A Literature Review. Energy and Buildings zur Veröffentlichung eingereicht.
[26] *Sherman, M. H.*: Air Infiltration in Buildings. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-10712 (1980).
[27] *Modera, M. P., M. H. Sherman u. P. A. Levin*: A Detailed Examination of the LBL Infiltration Model Using the Mobile Infiltration Test Unit. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-15636 (1983).
[28] *Diamond, R. C., D. J. Dickerhoff u. H. E. Feustel*: Infiltration Work at LBL: Review of Measurements and Findings. Tagungsband „Symposium on Measured Air Leakage Performance of Buildings", ASTM, Philadelphia (1984).
[29] *Sherman, M. H., u. D. T. Grimsrud*: Wind and Infiltration Interaction for Small Buildings. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-13949 (1982).
[30] *Blomsterberg, A. K., M. P. Modera u. D. T. Grimsrud*: The Mobile Infiltration Test Unit — Its Design and Capabilities: Preliminary Experimental Results. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-12259 (1981).
[31] *Shaw, C. Y., u. G. T. Tamura*: The Calculation of Air Infiltration Rates Caused by Wind and Stack Action for Tall Buildings. ASHRAE-Transactions 83 (1977) Part II, S. 145/58.
[32] *Akins, R. E., J. A. Peterka u. J. E. Cermak*: Average Pressure Coefficients for Rectangular Buildings. Tagungsband der „5. International Conference Wind Engineering". Boulder, Colorado /1979).

[H 824]

Für die Durchsicht der Arbeit und die zahlreichen Anregungen möchte ich meinen Kollegen *Peter Cleary, Dariusch Hekmat* und Dr. *Alan Meier* vom Lawrence Berkeley Laboratory danken. Dr. *Peter Hartmann* von der Eidgenössischen Materialprüfanstalt Dübendorf und Dr. *Lutz Trepte* von der Dornier System GmbH haben mit ihrer ausführlichen Diskussion dazu beigetragen, den dargebotenen Stoff besonders auf deutsche Belange zuzuschneiden.