

ZUR ÜBERSCHLÄGIGEN BESTIMMUNG DES LUFTAUSTAUSCHES IN GEBÄUDEN



Die Luftmassenstromverteilung eines Gebäudes – und damit sowohl die Raumluftbelastung als auch die Lüftungswärmeverluste – ließen sich bisher ohne detaillierte Simulationsprogramme nur sehr schwer abschätzen. Gerade aber für die Frage der ausreichenden Belüftung eines Gebäudes in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen ist die Kenntnis der Luftverteilung besonders wichtig. Herkömmliche Simulationsprogramme erfordern in der Regel neben einem leistungsfähigen Rechner einen erheblichen Eingabeaufwand. Deshalb werden am Lawrence Berkeley Laboratory der University of California (LBL) bereits seit mehr als zehn Jahren auch vereinfachte Rechenmodelle entwickelt. Das hier vorgestellte Handrechenverfahren gestattet es, die Luftstromverteilung für beliebige Witterungsbedingungen und beliebig komplizierte Gebäudegrundrisse überschlägig zu bestimmen. Darüber hinaus können auch nur besonders interessierende Gebäudeteile untersucht werden, was den Rechenaufwand nochmals erheblich verringert*).

Dr. Helmut E. Feustel, Lawrence Berkeley Laboratory der University of California, USA

Professor Trümper zur Emeritierung

*) Diese Arbeit wurde durch den Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy, Office of Building Energy Research and Development, Building Systems Division of the U.S. Department of Energy unter Kontrakt Nr. DE-AC0376SF00098 gefördert.

Einführung

Die Lüftung hat die Aufgabe, Raumlasten (Wärme, Schadstoffe, Feuchtigkeit) auf dem möglichst direkten Wege abzuführen. Luftströme, die eine Zone über die inneren Strömungswiderstände erreichen, also von einer anderen Zone des Gebäudes kommen, können aber bereits dermaßen mit Schadstoffen gesättigt sein, daß ein Verdünnungseffekt nicht mehr eintritt. Aus diesem Grunde ist es wichtig, zwischen Außenluftströmen und internen Luftströmen zu unterscheiden. Herkömmliche Meßmethoden zur Bestimmung des spezifischen Luftstromes einer Zone, die mit nur einem Spurengas arbeiten, sind nicht in der Lage, eine Unterscheidung zwischen Außenluftströmen und internen Luftströmen zu treffen. Erst der massive Einsatz von Kleinrechnern machte es möglich, kompliziertere Meßverfahren zu entwickeln, die eine Herkunftsbestimmung der eindringenden Luftströme ermöglichen [1; 2; 3].

Bild 1: Einflußgrößen auf die Druck- und Luftmassenstromverteilung innerhalb eines Gebäudes

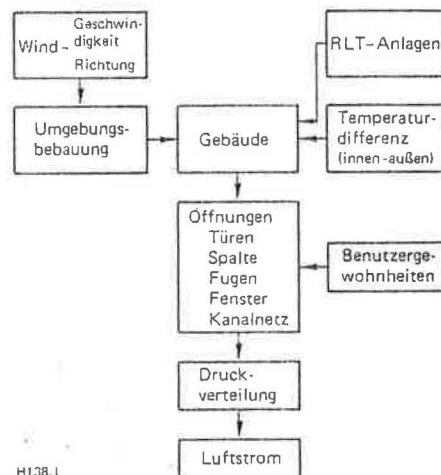
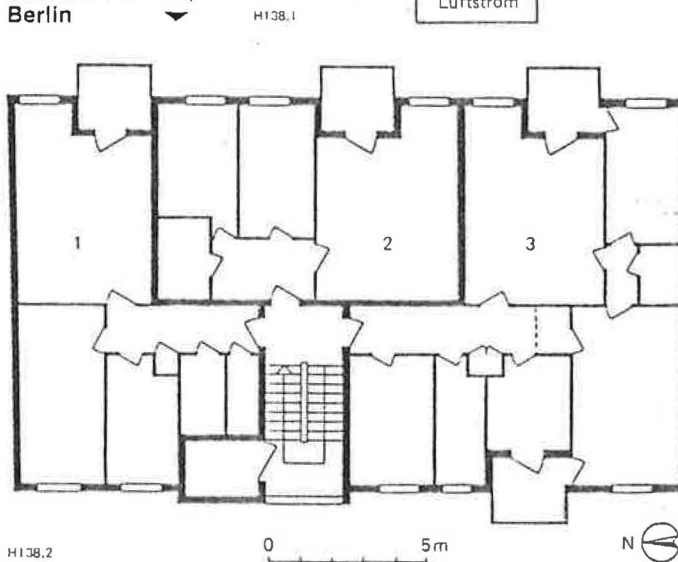


Bild 2: Grundriß Gebäude Brunsbüttler Damm 37, Berlin



Als Folge der Energiepreiskrisen des vorigen Jahrzehnts wurden zur Verringerung der Lüftungswärmeverluste in nahezu allen Industrienationen gesetzliche Grundlagen zur Begrenzung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle geschaffen. Obgleich diese Maßnahmen lediglich darauf zielten, nur die Spitzen der Fugenlüftung abzubauen, ergaben sich als Folge dieser Luftdurchlässigkeitsbegrenzung erhebliche bauphysikalische und hygienische Probleme. Dies trifft besonders für den Gebäudebestand der Länder zu, in denen noch immer auf eine maschinelle Lüftung verzichtet wird.

Die Lüftung eines Gebäudes ist von den Windverhältnissen, der Temperaturdifferenz innen/außen, der Umgebungsbebauung, eventuell vorhandenen maschinellen Lüftungssystemen und den inneren Strömungswiderständen sowie denen der Gebäudehülle abhängig (s. Bild 1). Wegen dieser komplexen Zusammenhänge war es bisher schwierig, die Luftstromverteilung innerhalb eines Gebäudes ohne den Einsatz von Simulationsprogrammen auch nur qualitativ zu bestimmen.

Zweifellos ist dies einer der Gründe dafür, daß noch heute viele der Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern lüftungstechnisch unterversorgt sind. An einem Beispiel soll dieses Problem verdeutlicht werden: Ein achtgeschossiges Gebäude (Grundriß s. Bild 2, Fugendurchlaßkoeffizienten s. Tabelle 1) mit jeweils drei Wohneinheiten je Geschloß wurde mit den nach DIN 4701 [4] zulässigen Fugendurchlaßkoeffizienten für den Standort Berlin (Wetterdaten s. [5]) bezüglich der reinen Fugenlüftung simuliert. Das Gesamtgebäude zeigt über die Heizperiode des „Typical Meteorological Year“ (TMY) für Berlin einen geringen mittleren spezifischen Außenluftvolumenstrom, der nur geringfügig über 0,1 (m³/m³ h) liegt [6]. Das sind nur 20% des aus bauphysikalischen und hygienischen Gründen geforderten Mindestwertes [7].

Bild 3 zeigt die Verteilung der mittleren spezifischen Außenluftvolumenströme für die einzelnen Wohneinheiten. Solche Wohneinheiten, die Fenster in zwei Außenwänden aufweisen, erfahren nur einen relativ geringen Abfall der Außenluftversorgung mit der Höhe. Demgegenüber reduziert sich die Außenluftversorgung der Wohneinheiten des Types 2 für die oberen Geschosse auf nur etwa 1% des Erdgeschoßwertes. Den größten Teil des Jahres wird diese Wohneinheit also mit Luft aus dem Treppenhaus versorgt. Dabei handelt es sich um eine Mischung aus Außenluft und

Tabelle 1: Fugendurchlaßkoeffizienten für Gebäude Brunsbüttler Damm 37

Bauteil	Fugendurchlaßkoeffizient a [m ³ /(m h Pa ^{2/3})]
Fenster	0,30
Balkontüren	1,00
Wohnungstüren	3,00
Haustür	2,00

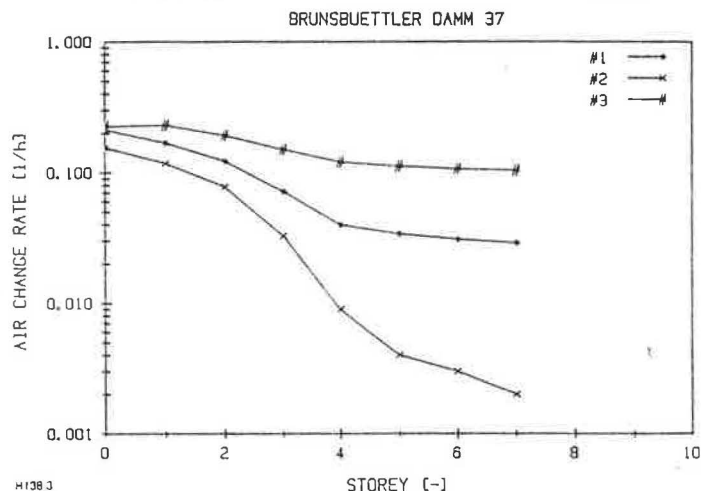


Bild 3: Mittlere spezifische Außenluftvolumenströme über die Heizperiode für die einzelnen Wohneinheiten in Abhängigkeit von der Höhe im Gebäude

Luft, die von den Wohneinheiten der unteren Stockwerke in das Treppenhaus einströmt.

Dieses Problem hätte durch die Bestimmung der Luftmassenstromverteilung mittels eines Rechenprogramms schon während der Planungsphase erkannt werden können. Es sei hier noch einmal darauf aufmerksam gemacht, daß der nominale Luftvolumenstrom, der mit herkömmlichen Spurengasmethoden meßtechnisch bestimmt werden kann, für alle Wohneinheiten des Gebäudes, unabhängig von der Höhenlage, zwischen 0,1 und 0,2 (m³/m³ h) liegt. Bei Anwendung dieser Meßmethoden wird die angesprochene Problematik also gar nicht deutlich.

Herkömmliche Rechenmodelle zur Bestimmung der Luftmassenstromverteilung stellen das Gebäude als ein vernetztes System von Strömungswegen dar; wobei die Knotenpunkte die einzelnen Zonen des Gebäudes und die Kanten des Graphen die Strömungswege wiedergeben. Die

Formelzeichen		t	Temperatur (°C)	T	Temperatur (K)
a	Fugendurchlaßkoeffizient (m ³ /m h Pa ^{2/3})	v	Luftgeschwindigkeit (m/s)	α	Exponent (-)
c	Druckbeiwert k (-)	vorz	Vorzeichen des folgenden Klammernausdrucks (-)	φ	Windrichtung (°)
c _{lee}	Mittelwert des Druckbeiwertes für die Leeseite (-)	x, y, z	Koordinaten (m)	λ	Reibungszahl (-)
c _{luv}	Mittelwert des Druckbeiwertes für die Luvseite (-)	z ₁	Fugentiefe (m)	v	Viskosität (m ² /s)
g	Erdbeschleunigung (m/s ²)	z ₀	Referenzhöhe für Windgeschwindigkeitsmessungen (m)	ρ	Dichte der Luft (kg/m ³)
h	vertikaler Abstand zweier Öffnungen (m)	A	effektive Öffnungsfläche (m ²)		
i	Exponent für Spaltströmung (-)	D	Luftdurchlässigkeit einer Gebäudekomponente (m ³ /h Pa ⁿ)		
j	Stockwerksnummer (-)	D _h	hydraulischer Durchmesser (m)	Indizes	
k	Anzahl der Stockwerke (-)	D _{lee, Hülle}	Luftdurchlässigkeit der Leeseite (m ³ /h Pa ⁿ)	1, 2	von, nach
l	Fugenlänge (m)	D _{res}	resultierende Durchlässigkeit (m ³ /h Pa ⁿ)	a	außen
m	Luftmassenstrom (kg/h)	D _{Schacht}	Luftdurchlässigkeit zum Schacht hin (m ³ /h Pa ⁿ)	i	innen
n	Druckexponent (-)	D _{total, Hülle}	Gesamtluftdurchlässigkeit der Gebäudefassaden (m ³ /h Pa ⁿ)	lee	dem Wind abgewandte Seiten des Gebäudes
p	Druck (Pa)	H	Höhe des Gebäudes (m)	luv	dem Wind zugewandte Seiten des Gebäudes
p ₀	barometrischer Druck (Pa)	Q	Luftvolumenstrom (m ³ /h)	therm	thermisch
p _{dyn}	dynamischer Druck in der ungestörten Außenströmung (Pa)	Re	Reynoldszahl (-)	wind	Wind
p _k	Gesamtdruck am Element k (Pa)				
Δp	Druckdifferenz (Pa)				

STELLENANGEBOT

Dynamisch aufstrebendes Ingenieurbüro sucht zum Eintritt für den 1. Oktober 1989

Ingenieur der Versorgungstechnik

Fachrichtung: Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik

mit mind. 3-jähriger Berufserfahrung.

Wir bieten:

- selbständiges Bearbeiten von Klein-, Mittel- und Großprojekten
- angenehmes, kollegiales Betriebsklima
- leistungsgerechte Bezahlung

Bewerben Sie sich bitte schriftlich oder rufen Sie uns ab dem 1. August 1989 an.

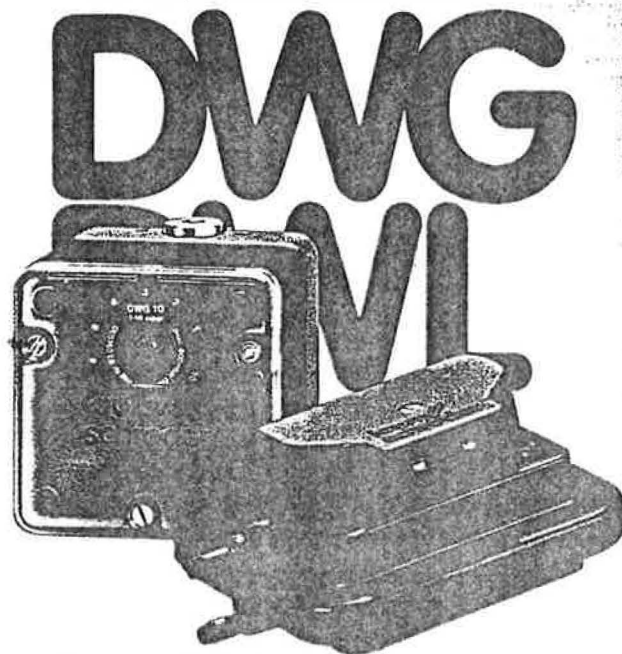
PLANUNGS-GRUPPE-TECHNIK

W. Zielinski + Partner

Basler Landstraße 52, 7800 Freiburg i. Br.

Telefon (07 61) 4 24 94

Experten für Gas- und Luftkontrolle



Druckwächter für Gas und Luft

Sicher und zuverlässig bei der Überwachung von Gas- und Luftdrücken: **DWG**.

Als Gas-Luftdruckmangelsicherung, als min/max Grenzwertgeber, für Gas, Biogas, Luft und Rauchgas.

- // für Über-, Unter- und Differenzdruck
- // Schaltbereiche von 0,7 bis 500 mbar
- // mit Handrückstellung, nicht blockierbar (Ausf. H und N)

Die Vorteile des **DWL** sind eindeutig: kompakt und preiswert für den Einsatz im Brenner- und Kesselbau, zur Abgaskontrolle, in der Klimatechnik, in Be- und Entlüftungsanlagen und überall dort, wo Luft- und Rauchgasdrücke kontrolliert und geschaltet werden.

- // für Über-, Unter- und Differenzdruck
- // Schaltbereiche ab 0,3 bar mit geringsten Schaltdifferenzen
- // Kontaktbelastung bis 5 A (Wechsler)
- // Schlauchsteckanschlüsse

Alle DWG und DWL Modelle sind DIN-DVGW geprüft und registriert und international zugelassen.

Sprechen Sie mit uns.
Wir haben das komplette Programm.

*Gas sicher,
messen, regeln*

Kromschroder

Kromschroder AG
Postfach 28 09
D-4500 Ostbrück
Telefon (05 11) 12 14 0
Telex 5481833
Teletax 05 11-12 14-3 70

Coupon

Informationen über
Druckwächter für
Gas, Luft und Rauchgas
Gesamtprogramm
Besuch eines
Fachberaters
Preisliste

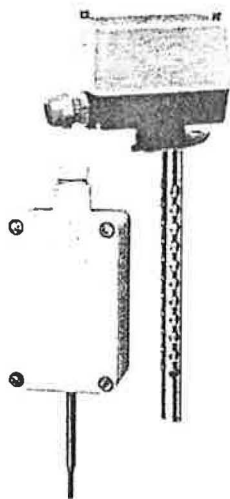
HLH 8.89

JUMO

Meßwertgeber für die Klimatechnik

Raum- und Außenwiderstandsthermometer

- für Temperaturmessungen in Räumen, Luftkanälen und im Freien
- mit integriertem Meßumformer lieferbar
- Meßbereiche von $-30...+60^{\circ}\text{C}$

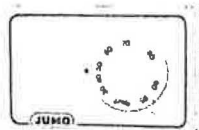


Hygrogeber und Hygrothermogeber

- für Messungen der relativen Luftfeuchte und der Temperatur in Räumen und Luftkanälen, Widerstandsfernegeber oder Stromausgang 0(4)...20 mA

Hygrostate

- zur Zweipunktregelung der relativen Luftfeuchte
- zur Steuerung von Be- und Entfeuchtungsanlagen



JUMO MESS- UND REGELTECHNIK

M. K. JUCHHEIM GMBH & CO · D-6400 FULDA
Postf. 1209 · Tel. (06 61) 6003-0 · Fax (06 61) 6003-500 · Ttx 6619726 · Tx 49701

Fordern Sie unseren Lager-/Preiskatalog 1989 an

Wir stellen aus INTERKAMA, Düsseldorf, Halle 5, Stand 5 E 32

zunehmender Bodenrauigkeit. Im Bereich innerstädtischer Bebauung bleibt die Oberflächenreibung auf eine Zone geringer Ausdehnung über den Rauigkeitselementen beschränkt. Darüber gleicht sich das Geschwindigkeitsprofil dem der ungestörten Strömung an. Bild 4 zeigt das Windprofil für drei ausgewählte Typen von Bodenrauigkeit bzw. Bebauungen ohne Berücksichtigung des oben beschriebenen Effektes [14].

Die Luftströmung ruft an einem Gebäude ein Druck- und Geschwindigkeitsfeld hervor. Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem dazugehörigen Druck an verschiedenen Stellen des Strömungsfeldes kann für die freie Anströmung aus der Bernoulli'schen Gleichung gefunden werden. Wegen der oben genannten Einschränkungen gilt Bernoulli jedoch nicht für Strömungen, wie sie an den nichtangeströmten Seiten eines Gebäudes auftreten.

Im Vergleich mit dem statischen Druck der ungestörten Anströmung entsteht um das Gebäude ein Druckfeld, das auf den windangeströmten Seiten einen Überdruck und auf den nichtangeströmten Seiten einen Unterdruck aufweist. Diese Druckverteilung wird in der Regel mit Hilfe von dimensionslosen Druckbeiwerten, die das Verhältnis aus der statischen Druckdifferenz an der Körperoberfläche zu dem dynamischen Druck des Windes darstellen, beschrieben:

$$c(x, y, z, \Phi) = \frac{p(x, y, z, \Phi) - p_0(z)}{\rho_{dyn}(z)} \quad (4)$$

mit

$$\rho_{dyn}(z) = \frac{1}{2} \rho_a v^2(z) \quad (5)$$

Die Druckverteilung an realen Gebäuden ist wegen der ständig in Frequenz, Richtung und Stärke wechselnden Winde meßtechnisch nur schwer zu erfassen. Neben der sich aus der Unstetigkeit des Windes ergebenden Notwendigkeit, alle Druckwerte simultan zu erfassen, bereitet die Festlegung eines geeigneten Referenzdruckes besondere Schwierigkeiten. Dennoch existieren eine Reihe von Veröffentlichungen, die solche Untersuchungen beschreiben. Die mannigfaltigen Einflüsse der Form des untersuchten Gebäudes sowie die Umgebungsbebauung erschweren in der Regel das Erkennen von Gesetzmäßigkeiten.

Aus diesem Grunde sind systematische Studien über die Winddruckverteilung an Modellgebäuden im Windkanal durchgeführt worden. Moderne Windkanäle sind bereits in der Lage, sowohl die Grenzschicht als auch die thermische Schichtung nachzubilden.

Ausführliche Beschreibungen der Arbeiten, die auf diesem Gebiet verfaßt wurden, sind vom AIVC [15] und dem LBL [16] erstellt worden. Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Verwendung von Druckbeiwerten aus der Literatur besteht darin, einen Datensatz zu finden, der den eigenen Fall repräsentiert. Welche Auswirkungen die Auswahl der Druckbeiwerte auf die Druckdifferenz innen/außen haben kann, sei hier anhand eines Beispiels aufgezeigt; für die Bestimmung der Luftstromverteilung in einem neugeschossigen Studentenwohnheim in Berkeley wurden Spurengasmessungen und Simulationsrechnungen durchgeführt. Da für dieses Gebäude keine Windkanalmessungen vorlagen, wurden die Druckbeiwerte der Literatur entnommen. Bild 5a zeigt die Druckverteilung für dieses Gebäude, wie sie sich gemäß der Angabe aus der Literatur ergibt. Die aus diesen Druckverteilungen errechneten Differenzdrücke zwischen dem Fluchttreppenhaus und der Luvseite des Gebäudes sind für zwei ausgewählte Geschosse für verschiedene Windgeschwindigkeiten dargestellt. Während für das

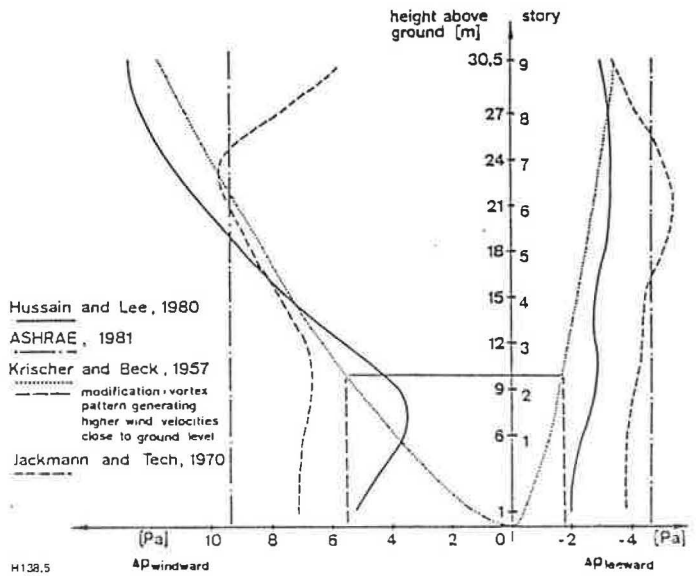


Bild 5a: Errechnete Winddruckprofile für ein neugeschossiges Studentenwohnheim; Druckbeiwerte sind der Literatur [17] entnommen

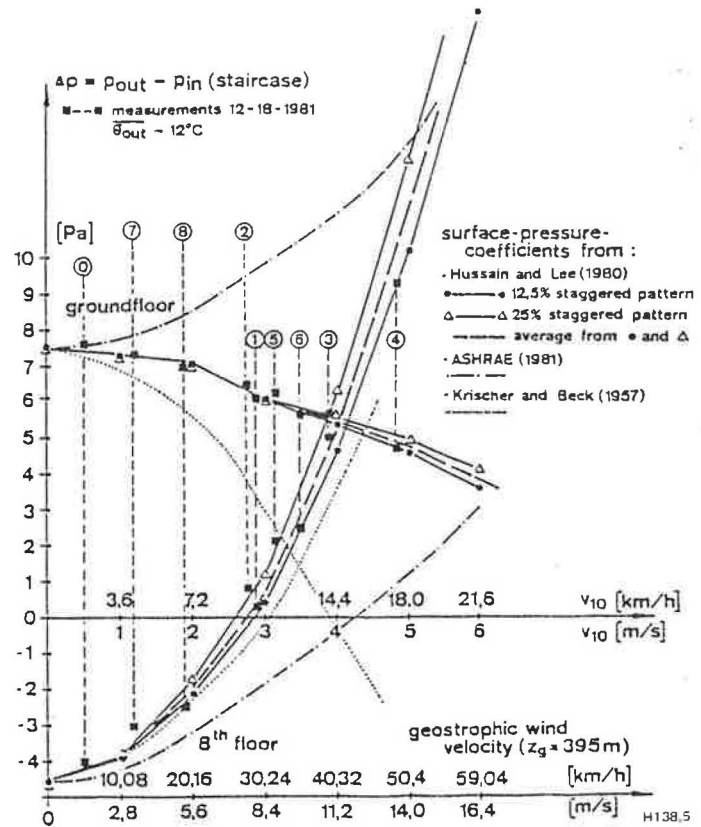


Bild 5b: Druckdifferenzen außen/innen auf der Luvseite für zwei ausgesuchte Stockwerke, entnommen [17]

achte Obergeschoß noch ein einheitlicher Trend für die Abhängigkeit der Druckdifferenz von der Windgeschwindigkeit erkennbar ist, ergeben sich für das Erdgeschoß, je nach gewählter Bezugsquelle für die Druckbeiwerte, völlig unterschiedliche Funktionen.

Aus den in der Regel mit der Höhe ansteigenden Druckbeiwerten läßt sich erkennen, daß sich in Gebäuden mit Strömungswiderständen zwischen den einzelnen Stockwerken die Innendrucke gemäß der Außendruckverteilung und der Öffnungsverteilung einstellen werden, was zu einer Ausgleichsströmung zwischen den einzelnen Stockwerken führt.

Thermische Druckdifferenzen

Temperaturdifferenzen zwischen der Luftsäule im Gebäude und der Außenluft haben Dichtedifferenzen zur Folge, die einen Druckgradienten zwischen der Außenluft und der Luft im Gebäude verursachen. Der Druckgradient dieser thermischen Auftriebskräfte hängt nur von der Temperaturdifferenz und der vertikalen Ausdehnung der betrachteten Zone des Gebäudes ab [18 u. 19]. Der Absolutwert der Druckdifferenz ist weiterhin von der Verteilung der Luftdurchlässigkeiten über der Gebäudehöhe abhängig, die auch die Höhe der neutralen Druckzone bei Windstille bestimmt. In der Höhe der neutralen Druckzone ist der Innendruck gleich dem Außendruck.

Das Druckgefälle infolge Temperaturunterschiedes errechnet sich aus der Bernoulli'schen Gleichung für einen durchgehenden Schacht bei Windstille zu:

$$\frac{d(\rho_i - \rho_a)}{dz} = g(\rho_a - \rho_i) \quad (6)$$

und nach Integration zu:

$$(\rho_i - \rho_a)_{\text{therm}} = g(\rho_a - \rho_i)(z - z_N) \quad (7)$$

Für einen Schacht mit nur zwei Öffnungen in unterschiedlicher Höhe läßt sich die Höhe der neutralen Zone nach [10] wie folgt bestimmen:

$$z_N = \frac{h}{1 + \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left(\frac{T_i}{T_a} \right) \right]} \quad (8)$$

wobei A_1 die effektive Fläche der unteren Lüftungsöffnung ist und A_2 die der oberen Öffnung.

Raumlufttechnische Anlagen

Raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) stellen über ihre Kanalnetze eine weitere Kopplung der Räume untereinander und eine Verbindung zu dem äußeren Druckfeld dar. Je nach der Druckstabilität der RLT-Anlage können sich Änderungen der Außendrucke über das Kanalnetz auf die Innendruckverteilung und damit auf die Luftmassenstromverteilung auswirken [20]. Auf die Möglichkeiten zur mathematischen Beschreibung der einzelnen Bauelemente von RLT-Anlagen wurde bereits in [8] näher eingegangen.

Luftdurchlässigkeit von Bauteilen

Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle hängt von der Anzahl der Fenster, Türen, Bauteilfugen und Spalte zwischen den Bauteilen ab. Zu diesen optisch wahrnehmbaren Durchlässigkeiten kommt noch die Hintergrunddurchlässigkeit, die durch die Porosität der Baustoffe bestimmt wird.

Bereits in den zwanziger und dreißiger Jahren wurden in Deutschland Arbeiten über die Luftdurchlässigkeit von Fenstern und Türen veröffentlicht [21 bis 23]. In den USA sind in diesem Zeitraum Messungen der Luftdurchlässigkeit von Außenwandkonstruktionen durchgeführt worden [24 u. 25]. Erst sehr viel später wurde versucht, die aus den Versuchen gewonnenen Gesetzmäßigkeiten physikalisch zu deuten und eine Analogie zur bekannten Rohrströmung herzustellen [26].

Für Spaltströmungen im laminaren Bereich konnte eine ähnliche Abhängigkeit der Reibungszahl von der Reynoldszahl gefunden werden, wie sie bei laminaren Rohrströmungen auftritt. Im turbulenten Strömungsbereich kann die Be-

rechnung der Reibungszahl für Spaltströmung ähnlich der Rohrströmung mit glatter Rohrwandung erfolgen (z.B. [27]).

Der Gesamtdruckverlust Δp_{Gesamt} der Spaltströmung kann wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta p_{\text{Gesamt}} = \Delta p_{\text{Reibung}} + \Delta p_{\text{Einlauf}} \quad (9)$$

mit den Einlaufverlusten

$$\Delta p_{\text{Einlauf}} = \Sigma \zeta^{1/2} \rho v^2 \quad (10)$$

direkt proportional dem dynamischen Druck der Spaltströmung, und demzufolge

$$\zeta \neq f(v) \quad (11)$$

Die Reibungsverluste lassen sich durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$\Delta p_R = \lambda \left[\left(\frac{z_i}{D_h} \right)^2 \right] 1/2 \rho v^2 \quad (12)$$

mit λ für vollkommen ausgebildete laminare Strömung:

$$\lambda = \frac{C}{Re} = C \left(\frac{v}{D_h v} \right) \quad (13)$$

und λ für vollkommen ausgebildete turbulente Strömung:

$$\lambda = [2 \log (Re \lambda^{1/2}) - 0,8]^{-2} \quad (14)$$

Aufbauend auf der Theorie der turbulenten Strömung ist der hydraulische Durchmesser D_h eine Funktion des Strömungsquerschnitts und der benetzten Umschließungsfläche. Für Spalte ergibt sich der Wert für den hydraulischen Durchmesser zu etwa dem Doppelten der Spalthöhe. Obgleich die obige Beziehung für den hydraulischen Durchmesser definitionsgemäß für laminare Strömungen nicht gilt, wird sie in Ermangelung einer aussagekräftigeren Kenngröße beibehalten.

Aus den vorhergehenden Beziehungen erkennt man, daß sowohl die Einlaufverluste als auch die Reibungsverluste für vollkommen ausgebildete turbulente Strömung dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional sind; die Reibungsverluste der laminaren Spaltströmung hingegen direkt proportional der Strömungsgeschwindigkeit sind.

Meßergebnisse der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen sind in der Regel so ausgewertet worden, daß ein exponentiales Verhältnis zwischen dem durch das Bauteil durchtretenden Luftvolumenstrom und der treibenden Druckdifferenz angegeben wird:

$$Q = [a l] \Delta p^n = D \Delta p^n \quad (15)$$

Der Wertebereich für den Exponenten n liegt zwischen $n = 0,5$ für vollkommen turbulente Strömung und $n = 1,0$ für vollkommen laminare Strömung. Wegen der bei endlichen Spalttiefen auftretenden Ein- und Austrittsverluste, die dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit proportional sind, kann selbst bei vollständig laminarer Strömung der Exponent nicht den Wert $n = 1,0$ annehmen. Für Spalte mit einer geringen Spalttiefe sind die Reibungsverluste gegenüber den Ein- und Austrittsverlusten vernachlässigbar gering, so daß der Spalt mathematisch als Einzelwiderstand ($n = 0,5$) behandelt werden kann.

Messungen von Volumenströmen und den dazugehörigen treibenden Druckdifferenzen wurden für verschiedene Spaltgeometrien so ausgewertet, daß sie dem Potenzansatz gemäß Gl. (15) entsprechen [27]. Die Ergebnisse zeigen, daß die spezifische Durchlässigkeit mehr von der Spalthöhe als von der Spalttiefe abhängt. Demgegenüber

Durchlässigkeitsverteilung über die Schachthöhe kann der Schachtdruck überschlägig wie folgt berechnet werden:

$$O = \sum_{j=1}^k \{ \text{vorz}(\rho_{i,j} - \rho_{\text{Schacht}}) | (\rho_{i,j} - \rho_{\text{Schacht}}) |^n \}$$

$$\approx \sum_{j=1}^k \{ \rho_{i,j} - \rho_{\text{Schacht}} \} \quad (35)$$

$$\rho_{\text{Schacht}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \rho_{\text{in},j} \quad (36)$$

Für diese Berechnung kann der Innendruck der einzelnen Stockwerke für ein Geschößtypgebäude herangezogen werden. Eine weitere Vereinfachung besteht in der Errechnung des Schachtdruckes allein aus den Mittelwerten der Drücke für das oberste und das unterste Stockwerk eines Gebäudes:

$$\rho_{\text{Schacht}} = 1/2 \{ \rho_{\text{in},j=1} (\text{epr}, \text{vpr} = 0) + \rho_{\text{in},j=k} (\text{epr}, \text{vpr} = 0) \} \quad (37)$$

Dabei wird davon ausgegangen, daß sich ein repräsentativer Innendruck für ein Stockwerk finden läßt. Mit Hilfe der folgenden, empirisch gewonnenen Gleichung kann der Innendruck je Stockwerk auch für Gebäude mit Strömungswegen zwischen den Stockwerken ($\text{vpr} \neq 0,0$) bestimmt werden. Somit lassen sich die Volumenströme mittels Gl. (20) errechnen.

$$\rho_i(z) = \rho_{\text{Schacht}} + \frac{2}{H} \{ \rho_{\text{in}}(H, \text{epr}, \text{vpr} = 0) - \rho_{\text{Schacht}} \} (1 - \text{vpr}^n) (z - H/2) \quad (38)$$

Rechenregeln zur Bestimmung der resultierenden Durchlässigkeit

Die resultierenden Durchlässigkeiten müssen für jede Zone des Gebäudes und für jede der unterschiedlichen Einflußgrößen getrennt bestimmt werden. Während dies in der Regel für die thermischen Auftriebskräfte relativ einfach ist (in Gebäuden mit $\text{vpr} \neq 0,0$; Reihenschaltung aus Wohnungstür und der Summe aller Öffnungen der Außenfassaden), kann sich die Bestimmung der resultierenden Durchlässigkeit für den Windanfall schwieriger gestalten.

Im Falle von Windangriff lassen sich die Teildurchlässigkeiten einer Durchlässigkeit auf der Luvseite, die mit zwei Durchlässigkeiten der Leeseite in Reihe geschaltet sind, wie folgt berechnen (s. Bild 11):

$$D_{3,1} = D_3 \frac{D_1}{D_1 + D_2} \quad (39)$$

Die Kombination von Durchlässigkeiten ist leider oftmals nicht so einfach zu beschreiben, wie in dem obigen Beispiel. Die Resultierende kann eine Kombination aus Durchlässigkeiten darstellen, die parallel und in Reihe zueinander über mehrere Zonen verteilt sind. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, daß z.B. die Durchlässigkeit der Leeseite für eine bestimmte Zone noch nicht berechnet worden ist. Der Anteil der Durchlässigkeit der Luvseite, bezogen auf die Durchlässigkeit $D_{\text{res leeseite}, k, l}$, wird dadurch bestimmt, daß die rpr -Unterschiede der betrachteten Zonen mit in die Berechnung einbezogen werden:

$$D_{\text{wind}, k, l} = D_{\text{wind}, \text{total}} \frac{(\text{rpr}_k - \text{rpr}_l) D_{\text{leeseite}, k, l}}{\sum_{j=1}^n [(\text{rpr}_j - \text{rpr}_l) D_{\text{leeseite}, j, l}] } \quad (40)$$

Dieser Fall ist in Bild 12 dargestellt. Für dieses Beispiel läßt sich die obige Gleichung wie folgt schreiben:

$$D_{B,1} = \frac{\Delta \text{rpr}_{I,IV} D_4}{\Delta \text{rpr}_{I,IV} D_4 + \Delta \text{rpr}_{II,IV} D_5 + \Delta \text{rpr}_{III,IV} D_6} \quad (41)$$

In diese Berechnung können auch die rpr -Werte der Luv- und der Leeseite einbezogen werden. Wir definieren den Resultant Permeability Ratio für die Luvseite zu $\text{rpr}_{\text{Luv}} = 0,0$ und den der Leeseite zu $\text{rpr}_{\text{Lee}} = 1,0$.

Für bestimmte Fälle kann es notwendig werden, die rpr -Werte iterativ zu bestimmen. Dafür wird der jeweilige opr -Wert der betreffenden Zone als Startwert angenommen. Die iterative Berechnung der rpr -Werte nimmt dabei jeweils dann mehr Zeit in Anspruch, wenn die Strömungsrichtung zwischen zwei Zonen infolge des Startwertes falsch angenommen wurde. Der Hauptgrund für die falsche Annahme der Strömungsrichtung ist in den fehlenden Informationen der inneren Strömungswege zum Startzeitpunkt zu sehen. Normalerweise tritt dies nur für Zonen mit opr -Werten $< 0,5$ auf. Die Berechnung zeigt die falsche Strömungsrichtung in der Regel nach zwei bis drei Iterationsschritten durch die Berechnung negativer rpr -Werte an.

Um im Falle der Iterationsrechnung zur Bestimmung des rpr -Wertes ein Divergieren zu verhindern, werden die errechneten Werte mit einem Dämpfungsfaktor versehen in den weiteren Iterationsprozeß eingebracht. Verschiedene Tests haben die Wirksamkeit des Dämpfungsfaktors

$$f_{\text{in}} = \frac{i}{i+1} \quad (42)$$

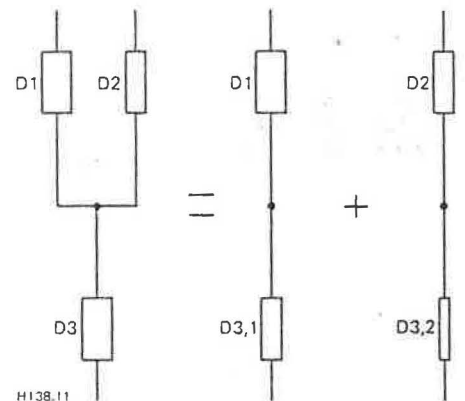


Bild 11: Bestimmung von Teildurchlässigkeiten für kombinierte Reihen- und Parallelschaltung

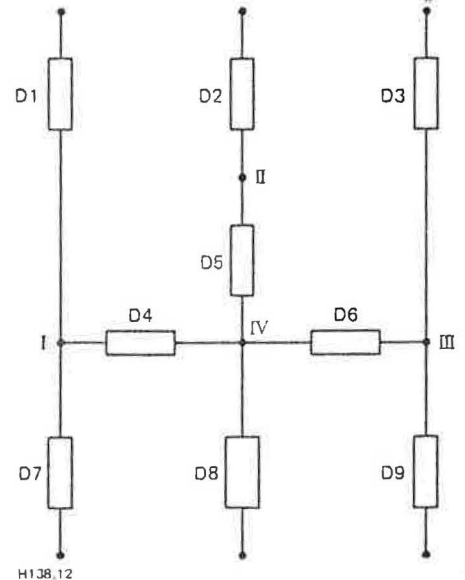


Bild 12: Bestimmung von Teildurchlässigkeiten für kompliziertere kombinierte Reihen- und Parallelschaltung (s. Gl. 41)

wobei i den betrachteten Iterationsschritt darstellt, bewiesen.

Beispiel

Das folgende Beispiel ist der ausführlichen Sammlung von Anwendungsmöglichkeiten des vereinfachten Rechenmodells entnommen [34]. Neben den hier nur kurz gestreiften Ergebnissen beinhaltet diese Veröffentlichung auch praktische Hinweise zur Benutzung des Modells.

Für das in Bild 2 dargestellte achtgeschossige Gebäude sind die in Tabelle 4 wiedergegebenen Durchlässigkeiten angenommen worden.

Der Vergleich zwischen dem simplifizierten Rechenmodell und einem auf der Massenbilanz beruhenden „detaillierten“ Rechenmodell zeigt für eine Referenz-Windgeschwindigkeit von 4 m/s bei einem vertikalen Windprofil für innerstädtische Bebauung und der in [32] vorgeschlagenen Winddruckverteilung nur geringe Unterschiede für die Gesamluftdurchströmung der einzelnen Stockwerke (s. Tabelle 5).

Die Berechnung der Luftdurchströmung der einzelnen Strömungswiderstände ist aufwendiger. Für ein Gebäude ohne Durchlässigkeiten zwischen den einzelnen Stockwerken ($v_{pr} = 0$) ergeben sich die in Bild 13 dargestellten Strömungswege. Die Ergebnisse für diesen Fall sind in Tabelle 6 wiedergegeben. Bis auf Luftmassenströme für die Tür der Wohneinheit 3 ergeben sich kaum Massenstromänderungen für die einzelnen Iterationsschritte. Obgleich der besagte Massenstrom eine Änderung um etwa 50% in fünf Iterationsschritten erfährt, ändert sich der Gesamtmassenstrom für die Wohneinheit um nur etwa 3%. Für Anwendungen, bei denen die einzelnen Teilströme für eine Zone ohne weitere Bedeutung sind, ist ein Iterationsprozeß hier gar nicht erforderlich.

Zur Bestimmung der Unterschiede zwischen dem vereinfachten Rechenmodell und dem „detaillierten“ Modell wurde das Gebäude für eine Referenzwindgeschwindigkeit von $v = 4$ m/s, eine innerstädtische Bebauung mit der bereits beschriebenen Druckverteilung und eine Temperaturdifferenz innen/außen von $\Delta t = 10$ K simuliert. Die folgenden Tabellen geben die Ergebnisse für die Simulationsrechnung mit dem vereinfachten Modell (Tabelle 7) und die Unterschiede zwischen den beiden Rechenmodellen (Tabelle 8) wieder.

Überall dort, wo sich Luftmassenströme gleicher Größenordnung, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen überlagern, wird der relative Fehler besonders groß. Dies wird besonders bei den Wohnungstüren im unteren Gebäudeteil sichtbar, wo die Winddrücke und die thermischen Auftriebskräfte in unterschiedlicher Richtung wirksam werden.

Zusammenfassung

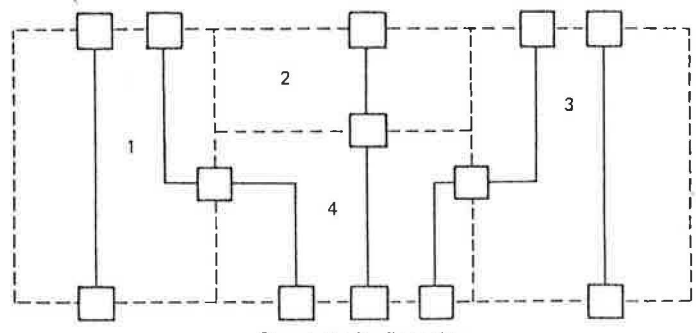
Der vorliegende Beitrag gibt eine Einführung in die Problemstellung anhand eines Beispiels und beschreibt die verschiedenen Rechenmodelle, die zur Bestimmung des Luftaustausches im Gebäude herangezogen werden können. Die physikalischen Grundlagen des Luftaustausches sowie die Berechnungsformeln, wie sie in herkömmlichen Rechenmodellen Anwendung finden, werden behandelt. Den Kern der vorliegenden Arbeit bildet die Beschreibung des Verfahrens zur überschlägigen Bestimmung der Luftstromverteilung in Gebäuden. Dafür sind verschiedene Vereinfachungen gegenüber den realen Verhältnissen, so wie sie von detaillierten Rechenmodellen beschrieben werden können, notwendig.

Tabelle 4: Durchlässigkeiten für die einzelnen Zonen des Gebäudes (Windrichtung = West)

Zone	Ort	Durchlässigkeit [m ³ /(h Pa ^{2/3})]
1	Luv	4,3
	Lee	8,6
	Tür	18,0
2	Luv	0,0
	Lee	11,6
	Tür	18,0
3	Luv	19,6
	Lee	17,1
	Tür	18,0
4	Luv	20,0
	Lee	0,0
	Türen	18,0

Tabelle 5: Gesamluftdurchströmung infolge Windangriffes (In m³/h) bei $v_{10} = 4$ m/s, $\alpha = 1/3$ und eine Winddruckverteilung gemäß [32]

Fall	Vereinf. Modell	Detail. Modell	Differenz in %
Erdgeschoß, Geschoßtyp	133	128	3,8
8. Obergeschoß, Geschoßtyp	185	183	1,1
Gesamtgebäude, Geschoßtyp	1205	1175	2,6
Gesamtgebäude, Schachttyp	1205	1172	2,8



H13a.13

Flow paths for floor plan
Brunsbüttler Damm 37

Bild 13: Strömungswege für das in Bild 2 dargestellte Gebäude für den Fall des Geschoßtypgebäudes ($v_{pr} = 0,0$)

Tabelle 6: Luftmassenströme infolge Windangriffes für unterschiedliche Iterationsschritte (kg/h) für das Erdgeschoß; $v_{10} = 4$ m/s, $\alpha = 1/3$, $t_a = t_i = 20$ °C und Winddruckverteilung gemäß [32]

Iterations-schritt	Wohnung 1			Wohnung 2		Wohnung 3	
	Luv	Lee	Tür	Tür	Tür	Lee	Luv
1	15,7	-35,8	20,1	35,5	13,2	-77,1	63,9
2	15,8	-35,0	19,2	37,5	10,8	-76,0	65,2
3	16,1	-35,3	19,2	37,8	10,5	-76,2	65,7
4	16,0	-35,2	19,2	38,7	9,4	-75,5	66,1
5	15,9	-35,4	19,5	38,7	8,8	-75,2	66,4
detailliertes Rechenmodell	16,0	-35,4	19,4	39,4	7,8	-75,0	67,2

Mit Hilfe von vier dimensionslosen Kennzahlen, die teilweise der Literatur entnommen worden sind, läßt sich die Luftstromverteilung in einem Gebäude erklären. Eine fünfte Kennzahl, die während der zweiten Entwicklungsphase gefunden wurde, dient der Bestimmung der Luftströme sowohl als Folge von Windangriff als auch infolge von Temperaturdifferenzen zwischen dem Gebäudeinnern und der Außenluft.

Gegenüber bereits vorhandenen Handrechenverfahren zur Bestimmung der Luftströme eines Gebäudes bietet das hier vorgestellte Verfahren den Vorteil, daß sowohl die Temperaturen als auch die Durchlässigkeitsverteilung vorhandenen bzw. zu erwartenden Bedingungen angepaßt wer-

den können. Dadurch lassen sich bezüglich der Öffnungsverteilung eben nicht nur Grenzwerte darstellen, sondern reale Gebäude.

Dieses Verfahren wird hauptsächlich dort Anwendung finden, wo die Berechnung der Luftstromverteilung entweder nicht häufig genug durchgeführt wird, um die Einarbeitung in eines der vorhandenen detaillierten Rechenprogramme zu rechtfertigen, oder, wo die Folgen der Veränderung eines oder mehrerer Parameter am Ergebnis entweder sofort ersichtlich, oder aber zumindest einfach nachvollziehbar sein müssen. Deshalb bietet sich dieses Verfahren auch besonders für den Lehrbetrieb an. [H 138]

Literatur

[1] *Afonso, C. F. A.; Maldonado, E. A. B.*: A Tracer Gas Procedure for the Simultaneous Evaluation of Effective Volumes and MultiZone Air Flows. In: Proceedings of the „Third International Congress on Building Energy Management“, ICBEEM, Lausanne, September 1987.

[2] *Riffat, S. B.; Eid, M.; Littler, J.*: Developments in a Multi-Tracer Gas System and Measurements using Portable SF6 Equipment. In: Proceedings of the 8th AIVC Conference „Ventilation Technology: Research and Application“, Überlingen, September 1987.

[3] *Alexander, D. K.; Etheridge, D. W.; Gale, R.*: Theoretical and Experimental Studies of Heat Loss due to Ventilation. In: Kongreßbericht XXI. Internationaler Kongreß für Technische Gebäudeausrüstung, Teil 2, Berlin, April 1980.

[4] DIN 4701 Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Teil 2: Tabellen, Bilder, Algorithmen. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin (1983).

[5] *Jahn, A.*: Das Test-Referenzjahr. Eine Sammlung stündlicher Werte interessierender Wetterelemente. Teil 2: Ein Test-Referenzjahr für Berlin (TRY-Berlin). HLH 28 (1977) Nr. 7, S. 257/65.

[6] *Feustel, H. E.; Lanz, Th. P.*: Patterns of Infiltration in Multifamily Buildings. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-Report 17584 (1984).

[7] *LeMarie, A.; Trepte, L.*: Guidelines for Minimum Ventilation Rates. In: Proceedings „ASHRAE/DOE/BTECC Conference „Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III“. Clearwater Beach, Dezember 1985.

[8] *Feustel, H. E.*: Beitrag zur theoretischen Beschreibung der Druck- und Luftmassenstromverteilung in natürlich und maschinell gelüfteten Gebäuden. Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 151 (1984), Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Oktober 1983.

[9] *Feustel, H. E.; Kendon, V. M.*: Infiltration Models for Multicellular Structures: A Literature Review, Energy and Buildings, Vol. 8, No. 2, (1985).

[10] ASHRAE Handbook, 1985 Fundamentals Chapter 22 „Ventilation and Infiltration“ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, (1985).

[11] *Feustel, H. E.*: Development of a Simplified MultiZone Infiltration Model. Lawrence Berkeley Laboratory, Report No. 19095, (1985).

[12] *Wolfsheer, U.; Gertis, K.*: Bodennahe Aerodynamik, Teil 1: Beschreibung des natürlichen Windes in Bodennähe. GI Gesundheitsingenieur 99 (1978), Nr. 9.

[13] *Zuranzki, J.*: Windbelastung von Bauwerken und Konstruktionen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld (1969).

[14] *Davenport, A. G.*: The Relationship of Wind Structure to Wind Loading. Proceedings of Conference „Wind Effects on Buildings and Structures“, National Physical Laboratory, June 1963.

[15] *Allen C.*: Wind Pressure Data Requirements for Air Infiltration Calculations. Technical Note AIC 13. Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK, (1984).

[16] *Kula, H.-G.; Feustel, H. E.*: Review of Wind Pressure Distribution as Input Data for Infiltration Models. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-Report No. 23886, (1988).

[17] *Feustel, H. E.; Zuercher, C.; Diamond, R. C.; Dickinson, J. B.; Grimsrud, D. T.; Lipschutz, R.*: Temperature- and Wind-Induced Air Flow Patterns in a Staircase. Computer Modelling and Experimental Verification. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-Report No. 14589, (1985).

[18] *Tamura, G. T.; Wilson, A. G.*: Pressure Differences Caused by Chimney Effects in Three High-Rise Buildings. ASHRAE Transactions, 73 (1967), Part II.

[19] *Esdorn, H.*: Luftdurchlässigkeit der Fenster und Druckverteilung im Gebäude. In: Das Hochhaus der BASF „Planung, Ausführung, Erfahrung“, J. Hoffmann, Stuttgart, (1958).

[20] *Esdorn, H.; Feustel, H. E.; Schmidt, M.*: Bericht Teilprojekt F. Jahresbericht Sonderforschungsbereich 159 – Krankenhausbau, Technische Universität Berlin, (1978).

[21] *Raisch, E.*: Die Wärme- und Luftdurchlässigkeit von Fenstern verschiedener Konstruktion. GI Gesundheits-Ingenieur 45 (1922).

[22] *Reier, H.; Frass, K.; Settele, E.*: Über die Frage der Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern. 1. Teilbericht, Wärmewirtschaftliche Nachrichten 6 (1932/33).

[23] *Sigwart, K.*: Luftdurchlässigkeit von Holz- und Stahlfenstern. GI Gesundheits-Ingenieur 55 (1932).

[24] *Houghten, F. C.; Ingels, M.*: Infiltration through Plastered and Unplastered Brick Walls. ASHVE-Journal 33 (1927).

[25] *Larson, G. L.; Braats, C.; Nelson, D. W.*: Air Infiltration through various Types of Brick Wall Construction: ASHVE-Journal 35 (1929).

[26] *Hahnemann, H.; Ehret, L.*: Der Strömungswiderstand im geraden, ebenen Spalt unter Berücksichtigung der Einlaufverluste. Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung (1942).

Tabelle 7: Luftmassenströme in kg/h; berechnet mit dem simplifizierten Rechenmodell; $v_0 = 4 \text{ m/s}$, $\alpha = 1/3$; $t_a = -10 \text{ °C}$ und Winddruckverteilung gemäß [32]

Stockwerk	Wohnung 1			Wohnung 2	Wohnung 3		
	Luv	Lee	Tür	Tür	Tür	Lee	Luv
1	32,7	13,0	-59,3	-36,4	-106,2	-58,8	107,0
2	28,7	-13,2	-43,1	-15,1	-82,1	-68,1	98,1
3	24,3	-27,3	-22,7	21,8	-53,7	-76,8	88,6
4	20,1	-38,9	15,8	41,3	-14,6	-86,7	80,7
5	18,4	-51,1	36,3	58,5	36,9	-103,1	82,1
6	16,3	-61,9	52,1	73,3	63,8	-117,7	82,7
7	13,9	-71,6	65,8	86,6	86,1	-131,1	82,6
8	11,1	-80,6	78,3	98,9	105,9	-143,5	82,1

Tabelle 8: Unterschiede der Luftmassenströme für die beiden Modelltypen (in %)*; $v_0 = 4 \text{ m/s}$, $\alpha = 1/3$, $t_a = -10 \text{ °C}$ und Winddruckverteilung gemäß [32]

Stockwerk	Wohnung 1			Wohnung 2	Wohnung 3		
	Luv	Lee	Tür	Tür	Tür	Lee	Luv
1	-4,8	-3,2	19,3	11,0	16,3	13,5	-16,0
2	-9,7	18,9	58,2	81,9	17,3	12,4	-15,3
3	-8,0	10,2	79,2	12,8	17,6	10,3	-13,1
4	-0,5	0,5	-6,7	-2,4	15,0	4,7	-4,6
5	1,6	0,0	5,7	0,7	8,3	-1,1	5,9
6	2,6	0,5	8,4	2,1	11,4	-2,5	9,9
7	3,4	0,8	8,9	2,7	12,6	-3,0	12,3
8	4,2	1,4	8,3	3,2	11,6	-3,0	14,1

*) Bezugsfall für die Berechnung ist die Gesamtluftmenge je Zone.

[27] *Esdorn, H.; Rheinländer, J.*: Zur rechnerischen Ermittlung von Fugendurchlässigkeitskoeffizienten und Druckexponenten von Bauteilfugen. HLH 29 (1978) Nr. 3, S. 101/108.

[28] *Hopkins, L. P.; Hansford, B.*: Air Flow through Cracks. Building Services Engineering, Vol. 42, (1974).

[29] *Thomas, D. A.; Dick, J. B.*: Air Infiltration through Gaps around Windows. JIHVE, Vol. 21, (1953).

[30] *Sasaki, J. R.*: Air Leakage Characteristics of some Brick and Concrete Block Walls. National Research Council of Canada, Technical No. 52, (1968).

[31] *Sherman, M. H.; Wilson, D. J.; Kiel, D. E.*: Variability in Residential Air Leakage. Tagungsband: Symposium on Measured Air Leakage Performance of Buildings, ASTM, Philadelphia, (1984).

[32] *Krischer, O.; Beck, H.*: Die Durchlüftung von Räumen durch Windangriff und der Wärmebedarf für die Lüftung. VDI-Berichte, Vol. 18, (1957).

[33] *Feustel, H. E.; Sherman, M. H.*: A Simplified Model for Predicting Air Flow in Multizone Structures. Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-22325, (1987).

[34] *Haugen, T.; Feustel, H. E.*: Applications of a Simplified Model for Predicting Air Flows Multizone Structures. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-Report No. 23035, (1987).