

LUFTSTROMVERTEILUNG IN EINEM MEHRFAMILIENWOHNHAUS



Bereits veröffentlichte Ergebnisse von Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Fugenlüftung für Gebäude unterschiedlicher Grundrißgestaltung zeigten im Jahresmittel erschreckend geringe Außenluftwechsel. In diesem Beitrag stellen die Autoren den Einfluß von unterschiedlichen Lüftungsstrategien auf die Luftstromverteilung und dessen Größe für ein Mehrfamilienwohnhaus dar. Die Ausführungen zeigen die Komplexität der Luftstromverteilung innerhalb eines Gebäudes. Zur Interpretation der Ergebnisse werden vier dimensionslose Kennzahlen, die die Luftdurchströmung von Gebäuden beschreiben, herangezogen. Die durch Simulationsrechnungen gewonnenen Ergebnisse werden Meßwerten gegenübergestellt, die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Lüftung im Wohnungsbau“ von anderen Autoren gewonnen wurden.

Dr. Helmut E. Feustel,
Lawrence Berkeley Laboratory,
University of California, Berkeley,
Dipl.-Ing. Thomas P. Lenz, Berlin



Einführung

Die verbesserte Wärmedämmung und die damit verbundene Verminderung der Transmissionswärmeverluste hat die Bedeutung des Lüftungswärmeverlustes erheblich vergrößert. Dabei handelt es sich sowohl um Verluste infolge kontrollierter Lüftung als auch um solche der Fugenlüftung. Letztere, durch Wind- und Auftriebskräfte verursacht, war bislang die Grundlage der Berechnungen des Lüftungswärmebedarfs (DIN 4701) [1] und des Jahreswärmeverbrauchs für Lüftung (VDI 2067) [2]. Während sich die Transmissionswärmeverluste — läßt man einmal dynamische Vorgänge außer acht — relativ leicht berechnen lassen, da sie direkt-proportional der Temperaturdifferenz zwischen dem Innern des Gebäudes und der Umgebungsluft sind, hängen die Lüftungswärmeverluste von weiteren Parametern, wie der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Umgebungsbebauung, der Luftdurchlässigkeit der Außenhaut und der Form des Gebäudes ab. Da hohe Windgeschwindigkeiten und große Temperaturdifferenzen selten miteinander korrespondieren, können bei höheren Außenlufttemperaturen wegen der dann möglichen höheren Windgeschwindigkeiten größere Werte für die Wärmeverluste infolge von Fugenlüftung auftreten, als dies für den Auslegungsfall der Heizanlage der Fall ist. Um die Luftdurchströmung von Gebäuden und die damit verbundenen Lüftungswärmeverluste rechnerisch zu bestimmen, wurden Simulationsprogramme entwickelt, die nach der Methode der nichtlinearen Netzwerke arbeiten [3].

In einer Untersuchung zur Bestimmung des Anteils des Jahreswärmeverbrauchs für Lüftung am Gesamt-Jahreswärmeverbrauch von Gebäuden wurden bei der Simulation des Fugenlüftungsverhaltens von 17 unterschiedlichen Gebäudegrundrissen mittlere Außenluftwechsel für eine Heizperiode von unter 0,25 ACH*) gefunden [4]. Eines der dabei untersuchten Gebäude wurde später auch im Rahmen des Großforschungsvorhabens „Lüftung im Wohnungsbau“ [5] von anderer Seite her meßtechnisch untersucht [6], so daß hier die gemessenen und die simulierten Werte verglichen werden können.

Berechnungsgrundlagen

Um den Jahreswärmeverbrauch für Lüftung für die untersuchten Gebäude zu bestimmen, wurde deren Luftaustausch an der Technischen Universität Berlin mittels eines Computerprogramms simuliert, bei dem die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems mittels der Newton-Raphson-Methode erfolgt. Die Wetterdaten für diese Simulationsrechnungen wurden einem Typical Meteorological Year (TMY) [7] für Berlin entnommen. Dabei wurden die Tage aus dem TMY herausgesucht, die den Kriterien der VDI 2067, wie der Festlegung der Periode der Heizzeit, der Heiztage während der Sommermonate sowie der Heizgrenztemperatur, entsprechen (Tabelle 1).

*) ACH (air change per hour) ist die international gebräuchliche Einheit für den Luftwechsel. Diese Einheit entspricht der Schreibweise h^{-1} .

Tabelle 1: Vergleich der Berechnungsgrundlagen gemäß VDI 2067 und TMY für Berlin-Grunewald

Bezeichnung	VDI 2067 [2]	TMY [7]
Heiztage der Heizperiode Z_Z	252,4	275,0
Heiztage der Sommerzeit Z_S	23,2	
Gradtagszahl der Heizperiode und der Sommerzeit: $G_{ts} + G_{tz}$	3 964,0	3 938,0

Die Winddruckverteilung für das Gebäude wurde so berechnet, daß immer entweder senkrechte Anströmung oder Anströmung unter einem Winkel von 45 Grad zur Gebäudefassade vorlag. Deshalb wurden die aktuellen Windrichtungen des TMY den acht Windrichtungen der Windrose zugeordnet. Die Berechnung des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils erfolgte nach dem Exponentialansatz [8], für dessen Anwendung lediglich eine Referenzwindgeschwindigkeit, eine Referenzhöhe (bei der die Messung der Referenzwindgeschwindigkeit erfolgte) und der Exponent für das Windprofil bekannt sein müssen. Der Exponent ist stark von der Umgebungsbebauung abhängig und kann der Literatur entnommen werden [9]. Für die vorliegende Studie wurde der Exponent mit $1/3$ angesetzt, was dem Windgeschwindigkeitsprofil einer innerstädtischen Bebauung entspricht. Wegen der Unsicherheit bezüglich des Windprofils in Bodennähe wurde für Höhenwerte unter 10 m über Grund jeweils die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe angesetzt (vgl. [10]).

Die dimensionslosen Druckbeiwerte zur Bestimmung der Winddruckverteilung um das Gebäude wurden infolge fehlender Meßwerte ebenfalls der Literatur entnommen. *Krischer* und *Beck* [11] geben für die dem Wind zugewandte Seite des Gebäudes einen Druckbeiwert von $c = 1,0$, für die Seiten parallel zum Wind und die dem Wind abgewandte Seite des Gebäudes $c = -0,3$ an. Für schräg angeströmte Gebäude ist es nicht zulässig, den Druck auf der Luvseite des Gebäudes für eine gegebene Höhe über Grund als unabhängig von der Lage einer Luftdurchlässigkeit anzunehmen. An der angeblasenen Ecke kann $c(x,y) = 1,0$ angesetzt werden. Zu den folgenden Ecken fällt der Winddruck an den angeströmten Wänden auf etwa $c(x,y) = 0$ ab. Die beiden Fassaden der Leeseite können für diesen Fall der Anströmung einheitlich mit $c = -0,5$ angenommen werden. Die Druckbeiwerte sind für beide Anströmarten als konstant über der Höhe angenommen worden. Das dabei entstehende Druckfeld deckt sich zufriedenstellend mit Druckverteilungen, wie sie von *Hussain* und *Lee* [12] aus Wind-

kanaluntersuchungen für geschlossene Bebauung gewonnen wurden.

Die physikalischen Grundlagen und die für die Simulationsrechnungen zur Anwendung kommenden Gleichungen zur Bestimmung des Fugenluftstromes sind in [4] wiedergegeben.

Für die Simulationsrechnungen wurde der für die Durchströmung des Gebäudes (bezüglich der Raumluftqualität) günstigste Fall, bei dem innerhalb einer Wohnung alle Türen offen sind, gewählt. Dies hat zudem den Vorteil, daß eine jede Wohneinheit als nur eine Zone, also ohne innere Strömungswiderstände, berechnet werden kann, was eine erhebliche Rechenzeiterparnis bedeutet. Die Gebäude wurden für die Simulation der mittleren Außenluftwechsel über die Heizperiode so orientiert, daß die Luftaustauschraten für das Gesamtgebäude ein Maximum erreichten. Das entspricht jeweils einer Ost/West-Orientierung der Häuser. Die Temperatur der Treppenhause schächte wurde gleitend in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur berechnet. Für den Fall der Norm-Außenlufttemperatur für Berlin (-14°C) wurde ein Wert von 10°C für die Treppenhautemperatur angesetzt; bei 20°C Außenlufttemperatur erreicht die Treppenhautemperatur ebenfalls 20°C . Für Zwischenwerte der Außenlufttemperatur folgt die Treppenhautemperatur einer linearen Interpolation zwischen den beiden Grenzwerten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Für alle anderen Räume des Gebäudes wurde die Innentemperatur einheitlich mit 20°C gewählt.

Bei der Simulation des Jahreswärmeverbrauches für Lüftung wurden für alle Wohnungen im Bereich der Sanitärräume Bedarfsentlüftungen mit Zeitschaltuhr angenommen. Eine Dauerentlüftung mittels zentraler Abluftanlage wurde für die Simulationsrechnungen aus energetischen Gründen ausgeschlossen. Für die später durchgeführten Simulationsrechnungen wurden auch die im Haus eingebauten Systeme berücksichtigt.

Zur Berechnung der Fugenlüftung wurden Fugendurchlaßkoeffizienten, wie sie in der DIN 4701 angegeben sind, verwendet. Alle Maße zur Bestimmung der Fugenlängen sind den Bauzeichnungen entnommen. Für den Exponenten des Differenzdruckes wurde ein Wert von $n = 2/3$ gewählt, der auch als Mittelwert für ganze Gebäude von verschiedenen Autoren [z.B. 14] bestätigt wird.

Über die Ergebnisse der Untersuchung zur Bestimmung des Jahreswärmeverbrauches für Fugenlüftung wurde bereits in verschiedenen Veröffentlichungen berichtet [z.B. 4, 13]. Hier

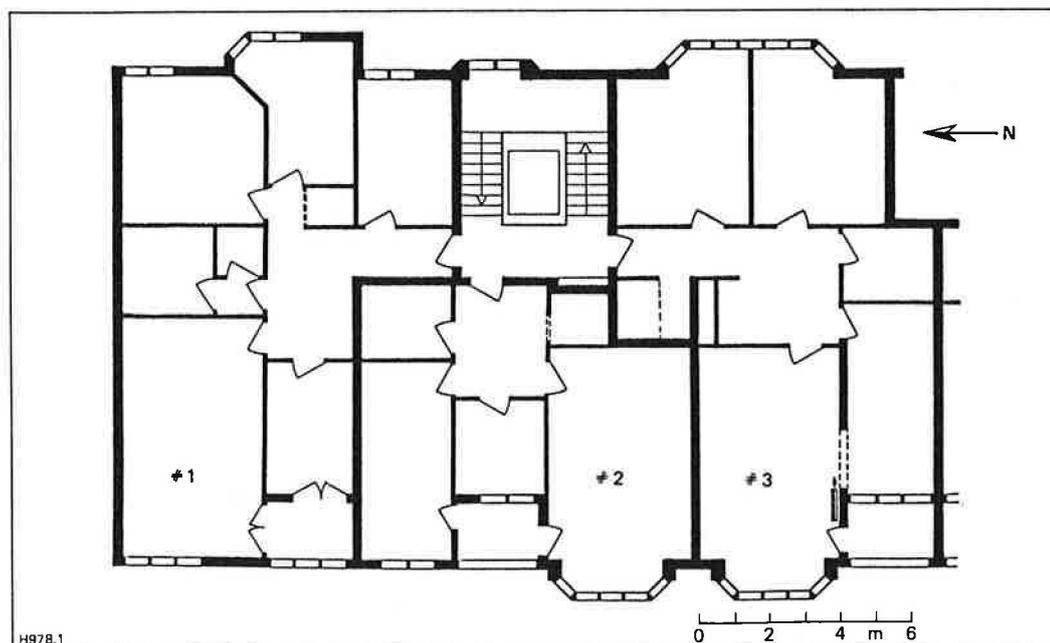


Bild 1: Grundriß Bülowstraße 96

sollen insbesondere die detaillierten, bisher nicht veröffentlichten Ergebnisse für das Haus dargestellt werden, für das auch die Vergleichsmessungen vorliegen.

Bei dem betrachteten Gebäude handelt es sich um ein Doppelhaus, das in zwei Hausaufgängen Wohnungen in sechs Obergeschossen aufweist. Im Erdgeschoß sind Läden, in den darüberliegenden Obergeschossen sind jeweils drei Wohneinheiten untergebracht. Zwischen zwei Dreizimmerwohnungen (je ca. 100 m²) mit Fenstern zur Hof- und Straßenseite hin, liegt je Obergeschoß eine Zweizimmerwohnung (ca. 63 m²) mit Fenstern nur zur Straße hin (s. Bild 1). Die einzelnen Geschosse sind über ein Treppenhaus miteinander verbunden, das zur Hofseite hin einfach verglaste Fenster besitzt.

Um die Luftmassenstromverteilung für verschiedene Witterungsbedingungen und unterschiedliche Lüftungssysteme darzustellen, wurden am Lawrence Berkeley Laboratory der University of California (LBL) weitere Simulationsrechnungen durchgeführt. Diesen Rechnungen wurden ebenfalls die in der DIN 4701 geforderten Fugendurchlaßkoeffizienten (Tabelle 2c; Fall 06) zugrunde gelegt. Da das Treppenhaus mit statischen Heizkörpern ausgestattet ist, wurde, gegenüber den Simulationsrechnungen mit Wetterdaten des Typical Meteorological Years, hier die Treppenhaustemperatur mit $t_i = 20^\circ\text{C}$ angesetzt. Daraus ergibt sich gegenüber den Jahresverbrauchsrechnungen ein geringfügig höherer Einfluß der thermischen Kräfte.

Als Witterungsbedingungen wurden:

- a) $v_{10} = 2 \text{ m/s}$; $t_a = -14^\circ\text{C}$;
- b) $v_{10} = 4 \text{ m/s}$; $t_a = 0^\circ\text{C}$ und
- c) $v_{10} = 4 \text{ m/s}$; $t_a = 10^\circ\text{C}$ gewählt.

Die Windanströmung wurde jeweils als rechtwinklig zur Fassade der Straßen- oder Hofseite angenommen. Für Außenlufttemperaturen, die über den hier gewählten liegen, dürfte die Fensterlüftung, die für diese Untersuchung nicht berücksichtigt wurde, als Lüftungsquelle überwiegen. In diesen Fällen wird der Wärmeverbrauch für Lüftung im wesentlichen vom Benutzerverhalten bestimmt.

Die maschinellen Lüftungssysteme sind wie folgt festgelegt worden:

1. Entlüftung der Sanitärräume mittels zeitschaltuhrgesteuerter Bedarfsentlüftung.
2. Entlüftung der Sanitärräume mit einer Grundlast von 30 m³/h plus Bedarfsentlüftung.
3. Entlüftung der Sanitärräume mit 60 m³/h Grundlast.
4. Belüftung der Wohnräume und Entlüftung der Sanitärräume mit einem Luftmassenstrom, der einem 0,5fachen Außenluftwechsel entspricht.

Die Berechnungsgrundlagen sind in Tabelle 2a bis 2c zusammengefaßt.

Tabelle 2a: Allgemeine Angaben für das Testhaus

Bezeichnung	B96
Hausart	Mehrfamilienwohnhaus
Baujahr	1982
Gebäudehöhe in m	21,0
Anzahl der Geschosse	7
Wohnungen je Obergeschoß	3
Wohnfläche Dreizimmerwohnung in m ²	100
Wohnfläche Zweizimmerwohnung in m ²	63

Tabelle 2b: Fugenlängen für die einzelnen Fassaden

Wohnungstyp #	Fugenlänge in m							
	Fenster				Balkontüren			
	Nord	West	Süd	Ost	Nord	West	Süd	Ost
Whg. 1	0,0	25,6	0,0	25,8	0,0	0,0	0,0	6,4
Whg. 2	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	12,8	0,0	0,0
Whg. 3	0,0	32,8	0,0	17,2	0,0	6,4	0,0	0,0

Tabelle 2c: Gewählte Fugendurchlaßkoeffizienten für die Simulationsrechnungen (m³/m h Paⁿ)

Fall	Fenster	Balkontür	Wohnungstür	Haustür
01	0,15	0,50	1,00	2,00
02	0,15	0,50	2,00	2,00
03	0,15	0,50	3,00	2,00
04	0,30	1,00	1,00	2,00
05	0,30	1,00	2,00	2,00
06	0,30	1,00	3,00	2,00
07	0,60	2,00	1,00	2,00
08	0,60	2,00	2,00	2,00
09	0,60	2,00	3,00	2,00

Simulationsergebnisse

Mittlere Außenluftwechsel

Mit den Fugendurchlaßkoeffizienten, wie sie die DIN 4701 vorschreibt, und den Wetterdaten des TMY für Berlin ergaben sich für die siebzehn untersuchten Grundrisse mittlere Außenluftwechsel über die Heizperiode von 0,04 bis 0,22 ACH [4]. Diese berechneten Luftwechsel decken sich gut mit Werten von Kurzzeitmessungen, die von Mitarbeitern der EMPA an anderen Mehrfamilienhäusern durchgeführt wurden [15]. Hygieniker und Bauphysiker verlangen aber einen Außenluftwechsel, der zwischen 0,5 und 1,0 ACH liegt [16, 17, 18, 19].

Für die Bewertung von mittleren Außenluftwechseln sollte allerdings weiterhin beachtet werden, daß die Schadstoffkonzentration (Formaldehyd, Radon, Verbrennungsprodukte von Feuerstätten, Tabakrauch etc.) jeweils vom Kehrwert des Luftwechsels bestimmt wird (s. Bild 2). Das heißt, daß sich für geringe Luftwechsel der hyperbolische Verlauf der Funktion besonders stark auf die Luftqualität bemerkbar macht. Demzufolge haben schon geringe Abweichungen vom Sollwert erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der Raumluft. Es wäre deshalb sinnvoll, für den quasistationären Fall anstatt der mittleren Außenluftwechsel den reziproken Wert des arithmetischen Mittels der stündlichen Kehrwerte derselben, den effektiven Außenluftwechsel (Effective Ventilation Rate, EVR), anzugeben [21]. Leider sind diese Werte seinerzeit nicht gesondert berechnet worden.

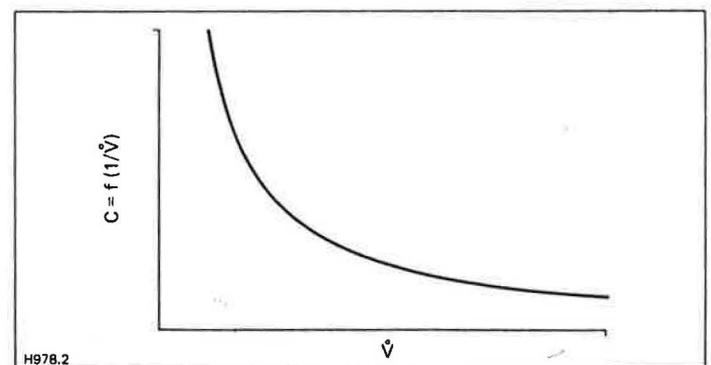


Bild 2: Schadstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Außenluftfrate im stationären Zustand

Wirksame Außenluftfrate
Kontinuitätsgleichung $V \dot{C} + \dot{V} C = F$ für quasistationären Zustand:
 $\dot{C} = 0$

$$C = F \left\{ \frac{1}{\dot{V}} \right\}$$

mit:

- F Quellstärke
- C Schadstoffkonzentration
- \dot{C} Schadstoffkonzentrationsänderung
- V Raumvolumen
- \dot{V} Luftvolumenstrom

Belüftung

Obleich schon die einzelnen Gebäude Gesamtaußenluftwechsel aufweisen, die weit unter den geforderten Luftwechseln liegen, zeigt die genauere Analyse der Simulationsergebnisse darüber hinaus einen erheblichen Einfluß der Höhenlage der betrachteten Wohneinheit auf den Luftwechsel. Es ist bekannt, daß die thermischen Auftriebskräfte für hohe Außenluftwechsel in den unteren Geschossen verantwortlich sind [1, 4, 13, 21, 23]. Demgegenüber werden die oberen Stockwerke eines Gebäudes vom Windeinfluß bestimmt; vorausgesetzt, es ist die Möglichkeit für eine Querlüftung gegeben. Für das betrachtete Gebäude zeigt Bild 3 die mittleren Außenluftwechsel für eine volle Heizperiode, die über der Höhe im Gebäude aufgetragen sind. Es ist besonders zu beachten, daß die mittlere Wohnung (#2), die nur zur Straßenseite hin Öffnungen in der Gebäudefassade besitzt, eine Verringerung der Außenluft-rate mit der Höhenlage erfährt, die einer ganzen Zehnerpotenz entspricht. Die Mittelwerte der Außenluftwechsel über die Heizperiode für die Zweizimmerwohnungen entsprechen damit für die oberen Stockwerke nur etwa 0,02 ACH. Das sind nur etwa 40% des geforderten Mindestaußenluftwechsels. Die Unterschiede für die Dreizimmerwohnungen (#1 und #3) sind, wegen der Querlüftungsmöglichkeiten, längst nicht so ausgeprägt [13].

Die Größenordnung der Außenluftwechsel infolge Fugenlüftung wird, außer von den Witterungsbedingungen, auch von der Öffnungsverteilung der Luftdurchlässigkeit (Verteilung der Undichtigkeiten) der betrachteten Zone sowie den korrespondierenden Werten für das gesamte Gebäude bestimmt. Welche Auswirkungen die Veränderung der Fugendurchlaßkoeffizienten von Fenstern und Wohnungseingangstüren auf den mittleren Außenluftwechsel für das Gesamtgebäude besitzt, wird in Tabelle 3 dargestellt. Dabei spielt, wie zu erwarten, die Dichtigkeit der Wohnungseingangstüren gegenüber der Durchlässigkeit der Fenster nur eine untergeordnete Rolle. Wie wir später sehen werden, ist dies nicht im gleichen Maße für die Luftmassenstromverteilung im Gebäude zutreffend, da durch die Durchlässigkeitsveränderung der Außenluftwechsel des Treppenhauses nachhaltig bestimmt wird.

Tabelle 3: Mittlere Außenluftwechsel infolge Fugenlüftung in Abhängigkeit der Durchlässigkeitsverteilung

Fall	Außenluftwechsel (ACH)
01	0,05
02	0,05
03	0,06
04	0,08
05	0,09
06	0,10
07	0,13
08	0,14
09	0,15

Momentaufnahmen

Die in die Wohneinheiten eindringenden Luftvolumenströme infolge von Winddrücken und thermischen Auftriebskräften sind in den Bildern 4a bis 4h dargestellt. Dabei ist die Windanströmung für die Bilder 4a bis 4f jeweils rechtwinklig zur Straßenseite, für die Bilder 4g und 4h als rechtwinklig zur Hofseite angenommen worden. Den Bildern liegen die Witterungsbedingungen gemäß „Berechnungsgrundlagen“ und die Durchlässigkeitsverteilung gemäß Fall 06 aus Tabelle 2b zugrunde. In den Bildern sind für jeden Wohnungstyp jeweils die eindringenden Luftströme von außen und vom Treppenhaus her aufgetragen.

Für den Fall der tiefen Außenlufttemperatur bei fehlender Grundlast einer maschinellen Entlüftung zeigt sich infolge der thermischen Auftriebskräfte ein stetiger Abfall der Außenluftströme mit zunehmender Höhe über Grund (Bild 4a). Alle drei

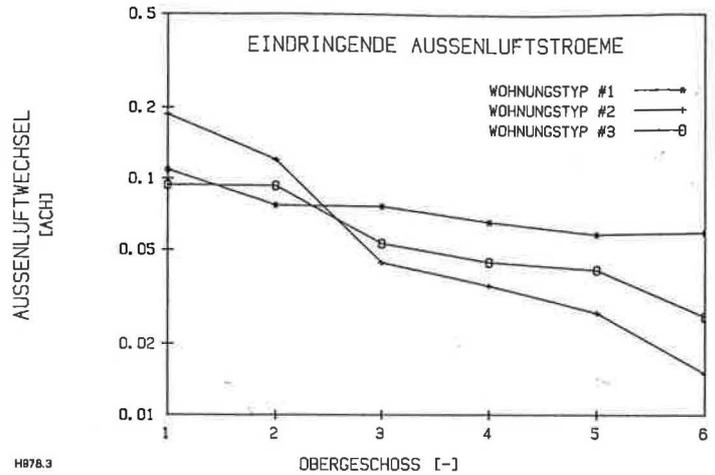


Bild 3: Mittlere Außenluftwechsel je Heizperiode für die Wohnungen des Hauses Bülowstraße 96 in Abhängigkeit von der Höhenlage im Gebäude

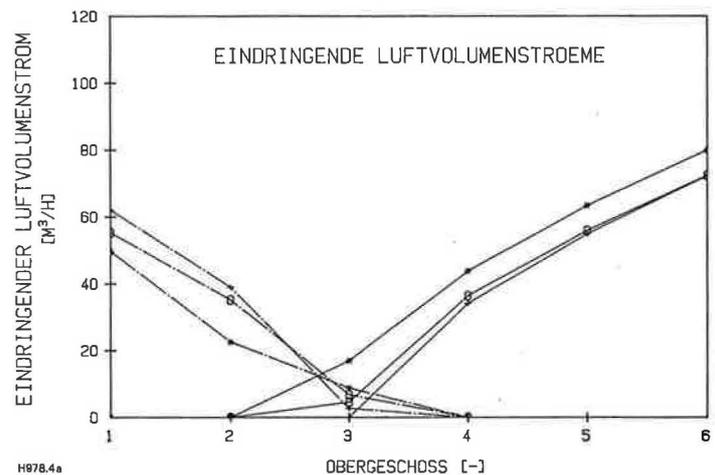


Bild 4a: Luftvolumenströme für Fugenlüftung, Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

- ▲— Außenluftströme für Wohnungstyp #1
- Außenluftströme für Wohnungstyp #2
- Außenluftströme für Wohnungstyp #3
- ▲— Luftströme vom Treppenhaus her für Wohnungstyp #1
- Luftströme vom Treppenhaus her für Wohnungstyp #2
- Luftströme vom Treppenhaus her für Wohnungstyp #3

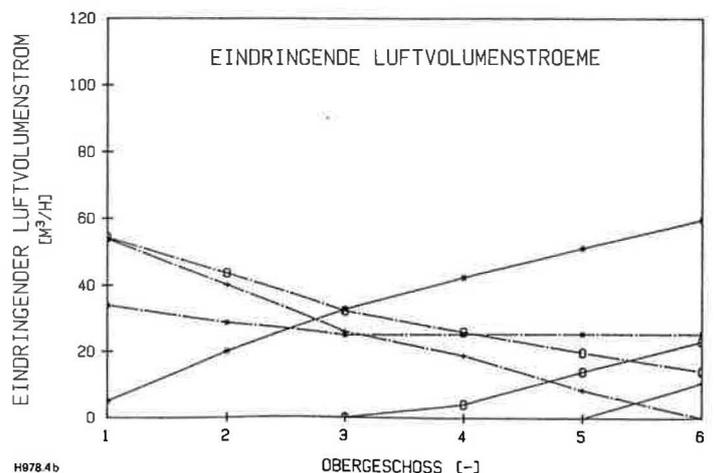


Bild 4b: Luftvolumenströme für Fugenlüftung, Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

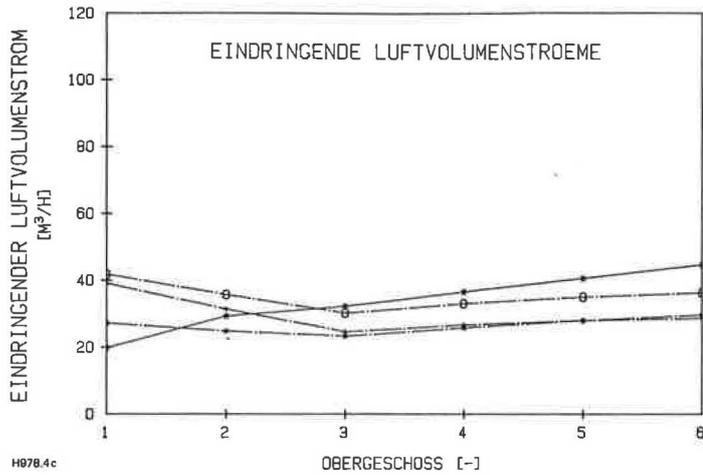


Bild 4c: Luftvolumenströme für Fugenlüftung, Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

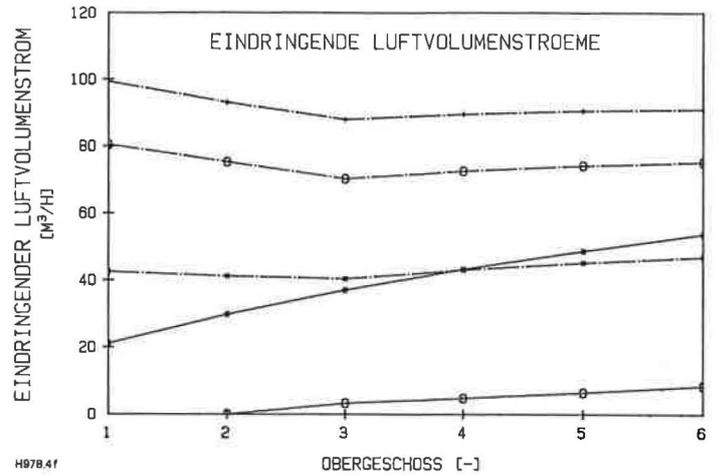


Bild 4f: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

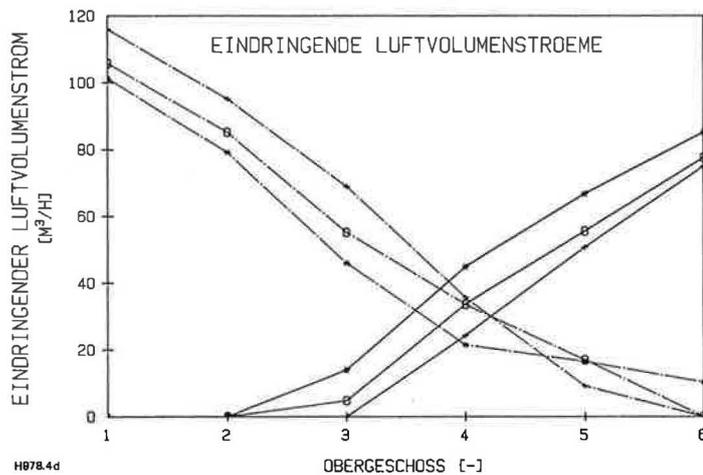


Bild 4d: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

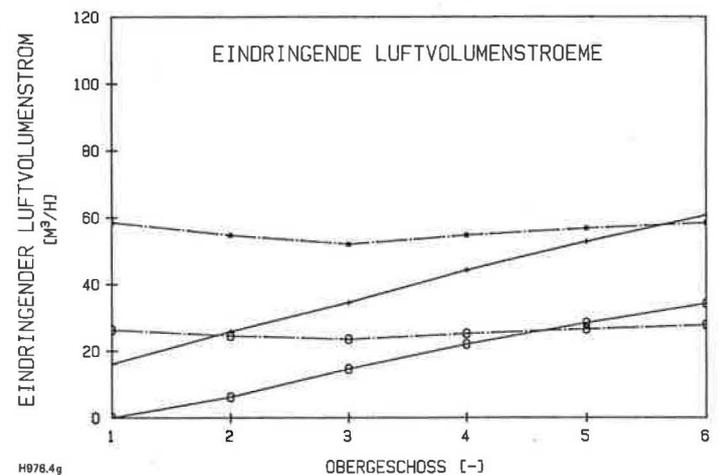


Bild 4g: Luftvolumenströme für Fugenlüftung. Windanströmrichtung vom Hof ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

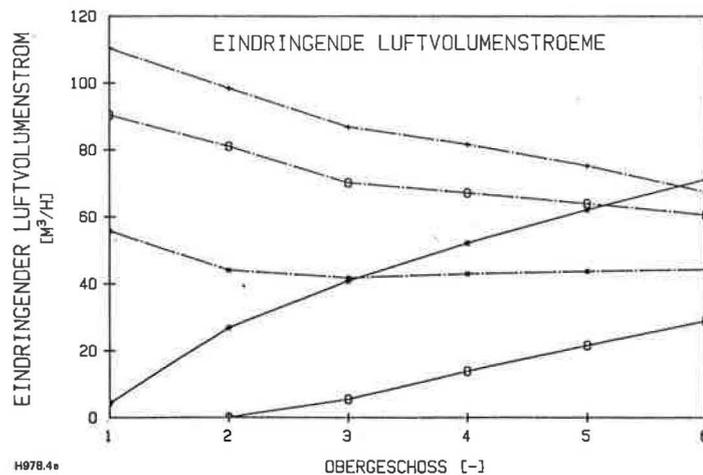


Bild 4e: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

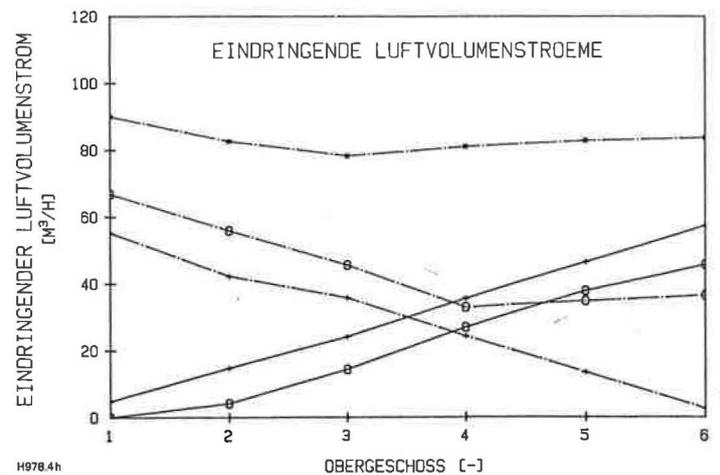


Bild 4h: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung vom Hof ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

Belüftung

Wohnungstypen erhalten oberhalb des dritten Obergeschosses keine Außenluft mehr. Der Verlauf der Luftströme vom Treppenhaus her in die Wohneinheiten verhält sich gegenläufig zu den Außenluftstraten. Ab dem vierten Obergeschoß dominiert der Lufteintritt über das Treppenhaus den Gesamtluftaustausch aller drei Wohnungstypen.

Mit steigenden Außenlufttemperaturen und höheren Windgeschwindigkeiten vergleichmäßigen sich die Außenluftströme für alle Wohneinheiten; d.h., der Einfluß der Höhenlage im Gebäude auf den Fugenluftstrom nimmt ab. Infolge der vom Wind hervorgerufenen hohen Drücke innerhalb der Wohnungen und der verringerten thermischen Kräfte innerhalb des Treppenhauses wird der vom Treppenhaus in die Wohneinheiten eindringende Luftstrom mit zunehmender Außenlufttemperatur bei gleichbleibender Windanströmrichtung verringert (s. *Bilder 4b* und *4c*). Bei einer treibenden Temperaturdifferenz von nur 10 K und einer Windgeschwindigkeit von $v_{10} = 4$ m/s (*Bild 4c*) ist der Höheneinfluß für die Luftstromverteilung im Gebäude nahezu abgebaut. Ein Luftstrom vom Treppenhaus in die Wohnungen ist nur noch für den Wohnungstyp #1 zu verzeichnen, wenn auch dieser in den oberen Geschossen noch den Außenluftstrom überwiegt.

Bei Aufprägung eines Abluftvolumenstromes je Wohneinheit von $\dot{V}_{ab} = 60$ m³/h erhöhen sich die Außenluftströme bei tiefen Außentemperaturen am Gebäudefuß um nahezu gerade diesen Betrag, während sich die Luftströme vom Treppenhaus her kommend für das Gesamtgebäude gegenüber dem Fall 4a nur geringfügig ändern (*Bild 4d*). Für den Fall der höheren Außenlufttemperatur ($t_a = 0$ °C) und der höheren Windgeschwindigkeit ($v_{10} = 4$ m/s) ist wiederum eine Vergleichmäßigung der Außenluftströme über der Höhe zu verzeichnen (*Bild 4e*). Infolge der Unterschiede der Verteilung der Undichtigkeiten der einzelnen Wohnungstypen (s. *Tabelle 2b*) ist die Zunahme der Außenluftströme nicht für alle Wohnungstypen gleich. Im Vergleich mit *Bild 4b* ist zu erkennen, daß sich die Außenluftströme für den Wohnungstyp #2 überdurchschnittlich erhöhen, während sich das Außenluftstromniveau für den Wohnungstyp #1 nur unwesentlich verändert. Es ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert, daß gerade dieser Wohnungstyp, unabhängig von der Temperaturdifferenz innen/außen, bei dieser Windanströmrichtung stets einen besonders hohen Anteil von Treppenhausluft an dem Gesamtluftstrom hat. Diese Verschiebung der Außenluftströme hat auch eine Verschiebung der Treppenhausluftströme zur Folge. Waren bei fehlender Grundlast der Abluftabsaugung alle drei Wohnungen des obersten Stockwerkes vom Treppenhaus her mit Luft durchströmt, so finden sich bei vorhandener Abluftabsaugung für die Wohneinheit #2 keine Luftströme vom Treppenhaus mehr.

Bild 4f zeigt die Luftmassenströme für eine Außenlufttemperatur von $t_a = 10$ °C. Gegenüber der vorhergehenden Abbildung fällt wiederum die Vergleichmäßigung der Luftströme über der Höhe auf. Auch hier sind die Auswirkungen der Abluftabsaugung für jeden der drei Wohnungstypen sehr unterschiedlich ausgefallen. Während sich der Außenluftstrom für Wohnungstyp #2 um nahezu gerade den Betrag der Abluft vergrößert, sind für den Wohnungstyp #1 wiederum nur geringe Veränderungen gegenüber dem Fall ohne Abluftgrundlast zu verzeichnen (vgl. *Bild 4c*).

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Einfluß der Windrichtung auf die Luftdurchströmung dieses Gebäudes für eine Außenlufttemperatur von $t_a = -14$ °C und $v_{10} = 2$ m/s. Wie zu erwarten, bleibt im Falle der fehlenden Grundlast für die Abluft, trotz der ausgeprägten Thermik, wegen des hohen mittleren Druckes innerhalb des zur Hofseite orientierten Treppenhauses eine Außenluftströme für den Wohnungstyp #2 selbst am Fuß des Gebäudes völlig aus. Dagegen ist für die zwei verbleibenden Wohnungstypen der Außenluftwechsel,

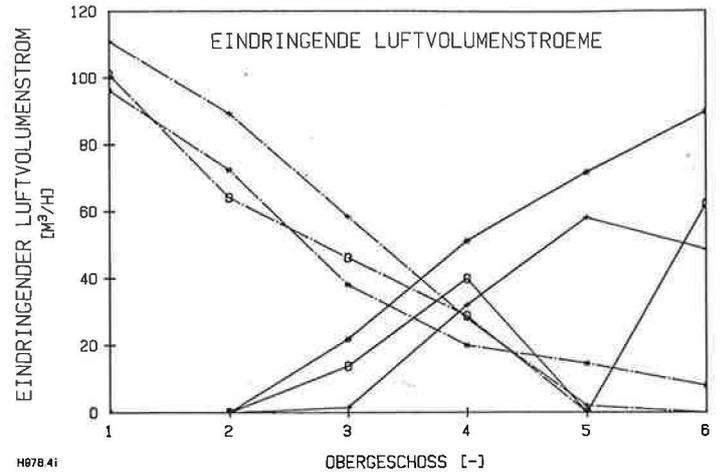


Bild 4i: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14$ °C, $v_{10} = 2$ m/s)

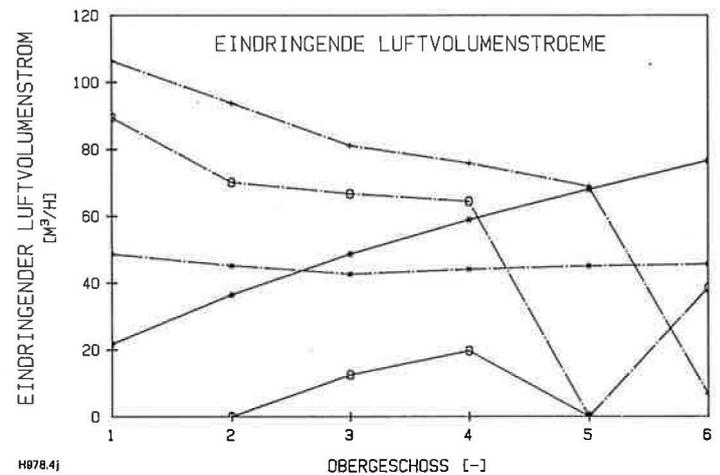


Bild 4j: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0$ °C, $v_{10} = 4$ m/s)

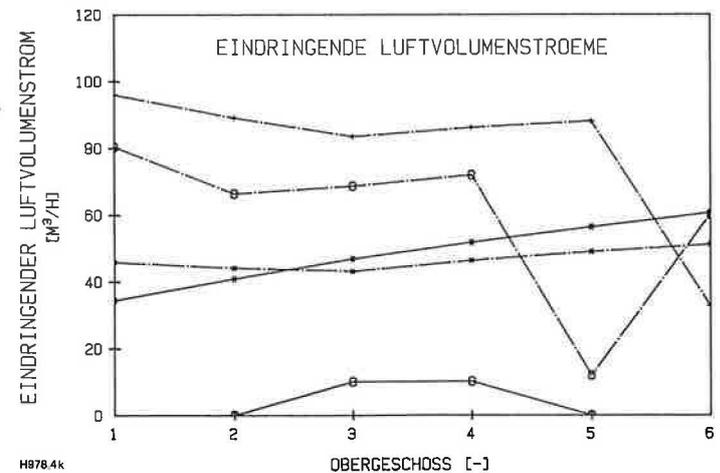


Bild 4k: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10$ °C, $v_{10} = 4$ m/s)

wenn auch auf verschiedenem Niveau, nahezu unabhängig von der Höhe über Grund. Die Luftrate für die Wohnungstypen #2 und #3 vom Treppenhaus her unterliegt demgegenüber einem starken höhenabhängigen Einfluß. Wegen der größeren Durchlässigkeit der Hoffassade für den Wohnungstyp #1 erhöht sich dessen Innendruck dergestalt, daß bei dieser Windanströmung ein Eindringen von Luft vom Treppenhaus her nicht möglich ist. Für den Wohnungstyp #2 steigen infolge der thermischen Auftriebskräfte die vom Treppenhaus her einströmenden Luftmassenströme mit zunehmender Höhe im Gebäude an. Dagegen verändern sich die vom Treppenhaus in den Wohnungstyp #3 eindringenden Luftströme qualitativ und quantitativ nur wenig gegenüber dem Fall ohne maschinelle Entlüftung.

Bei der Aufprägung eines Abluftstromes ergeben sich nunmehr für alle drei Wohnungstypen Außenluftströme. Während sich der Kurvenverlauf für die Außenluftrate für den Wohnungstyp #1 gegenüber der in Bild 4g auf einem höheren Niveau weitestgehend wiederholt, zeigen die vergleichbaren Werte des Wohnungstyps #2 eine starke Höhenabhängigkeit. Das ist ebenfalls für die Wohneinheit #3 im unteren Teil des Gebäudes der Fall.

Die Ergebnisse der Luftdurchströmung infolge von Fugenlüftung zusammen mit einer Be- und Entlüftungsanlage sind hier nicht graphisch dargestellt, da es sich im Falle einer abgeglichenen Anlage um eine reine Addition der Terme für Fugenlüftung und maschinelle Be- und Entlüftung handelt. Die Druckverteilung innerhalb des Gebäudes wird durch diese Art der Raumluftechnischen Anlagen nicht beeinträchtigt. Der Fugenluftanteil kann demzufolge den Bildern 4a bis 4c entnommen werden.

Alle Simulationsergebnisse sind in den Tabellen des Anhangs wiedergegeben.

Bewertungsmaßstab

Für die Bewertung der Simulationsergebnisse werden hier vier dimensionslose Kennzahlen, die die Luftdurchströmung von Gebäuden beschreiben helfen, eingeführt. Krischer und Beck [11] haben bereits 1957 die Abhängigkeit der horizontalen Luftdurchströmung für Einfamilienhäuser vom Haustyp beschrieben. Aus dieser Arbeit ergibt sich, daß für die Betrachtung der Luftdurchströmung von Gebäuden nur zwischen zwei Haustypen unterschieden werden muß; dem Reihenhaus mit etwa gleichen Durchlässigkeiten auf der Luv- und der Leeseite sowie dem Einzelhaus, bei dem die Durchlässigkeit auf der Leeseite dominiert. Esdorn und Brinkmann [22] haben etwa zehn Jahre später Mehrfamilienhäuser bezüglich ihrer vertikalen Durchlässigkeitsverteilung in Schachttyp- und Geschoßtypgebäude unterteilt.

Für die Entwicklung eines simplifizierten Rechenmodells zur Beschreibung der Luftdurchströmung von Mehrzonengebäuden am LBL [23] wurden aus den oben beschriebenen Hinweisen für das Gesamtgebäude die folgenden dimensionslosen Kennzahlen definiert: das Hüllen-Durchlässigkeits-Verhältnis (Envelope Permeability Ratio; *epr*) und das Vertikale-Durchlässigkeits-Verhältnis (Vertical Permeability Ratio; *vpr*).

$$epr = \frac{D_{Lee,Hülle}}{D_{total,Hülle}} \quad (1)$$

$$vpr = \frac{D_{Schacht}}{D_{total,Hülle} + D_{Schacht}} \quad (2)$$

mit:

- $D_{Lee,Hülle}$ Durchlässigkeit der Leeseite der Außenhülle
- $D_{total,Hülle}$ Durchlässigkeit der gesamten Außenhülle
- $D_{Schacht}$ Durchlässigkeit eines durchgehenden Schachtes zu den einzelnen Etagen hin.

Die Durchströmung der einzelnen Zonen eines Gebäudes lassen sich ebenfalls mit dimensionslosen Kennzahlen beschreiben; dem Außenwand-Durchlässigkeits-Verhältnis der Zone (Outside Permeability Ratio, *opr*) und dem Innenwand-Durchlässigkeits-Verhältnis der Zone (Inside Permeability Ratio, *ipr*).

$$opr = \frac{D_{Zone, Lee, Außenhülle}}{D_{Zone, Außenhülle}} \quad (3)$$

$$ipr = \frac{D_{Zone, Schacht}}{D_{Zone, Außenhülle} + D_{Zone, Schacht}} \quad (4)$$

mit:

- $D_{Zone, Lee, Außenhülle}$ Durchlässigkeit der Leeseite der Außenhülle der Zone (incl. aller Abströmwege durch nichtangeströmte Zonen)
- $D_{Zone, Außenhülle}$ Durchlässigkeit der gesamten Außenhülle der Zone (incl. aller Abströmwege durch nichtangeströmte Zonen)
- $D_{Zone, Schacht}$ Durchlässigkeit von einer Zone zu einem durchgehenden Schacht.

Die Werte der vier oben definierten Kennzahlen liegen jeweils zwischen 0 und 1 und eignen sich demzufolge auch für arithmetische Operationen. Für das untersuchte Gebäude ergeben sich die folgenden dimensionslosen Kennzahlen (Tabelle 4):

Tabelle 4: Dimensionslose Kennzahlen der Wohnungstypen

Wohnungstyp #	<i>opr</i> Windrichtung		<i>ipr</i>
	Straße	Hof	
Whg. 1	0,67	0,33	0,45
Whg. 2	0,07	0,93	0,43
Whg. 3	0,30	0,70	0,46

Während die Kennzahl *opr* die Fähigkeit einer Zone zur Querlüftung beschreibt, gibt *ipr* die Abhängigkeit der Zone von den thermischen Auftriebskräften wieder. Dabei bedeuten z.B. *opr* = 0,5 ideale Voraussetzung für Querlüftung und *ipr* = 1,0 eine besonders starke Abhängigkeit von der Thermik.

Diskussion der Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, daß, von wenigen Ausnahmen in den unteren Stockwerken einmal abgesehen, infolge von Fugenlüftung für alle Wohneinheiten des untersuchten Gebäudes keine ausreichenden Außenluftraten erreicht werden. Dieser Zustand läßt sich für einen erheblichen Teil der Heizperiode wesentlich durch den Einsatz von Entlüftungsanlagen in den Bädern verbessern. Lediglich an Tagen mit tiefen Außentemperaturen sind auch diese Anlagen nicht geeignet, eine Vergleichmäßigung der Außenluftraten innerhalb des Gebäudes vorzunehmen.

Wie der Vergleich der einzelnen Kurven der Bilder 4a bis 4h zeigt, haben die einzelnen Wohnungstypen des Testhauses unterschiedliche Luftdurchströmungscharakteristiken, die z.B. mit den Simulationsparametern Veränderungen unterworfen sind. Diese Luftdurchströmungscharakteristiken der einzelnen Wohnungen lassen sich auf deren Durchlässigkeitsverteilung, d.h. die Werte der dimensionslosen Kennzahlen, zurückführen.

Während die Wohnungen vom Typ #1 einen Wert für das Außenwand-Durchlässigkeits-Verhältnis (*opr*) von 0,67 für eine Windanströmung von der Straßenseite her besitzen, reduziert sich der korrespondierende Wert für den Wohnungstyp #3 auf

$opr = 0,30$. Für den Wohnungstyp #2 errechnet sich ein opr -Wert von 0,07. Die opr -Werte für die Windanströmung vom Hof her ergeben sich hier als Differenzwert des jeweiligen opr -Wertes für die Anströmung von der Straße her zum Minuenden 1,0.

Für alle drei Wohnungstypen ergibt sich für die innere Durchlässigkeitsverteilung (ipr) ein Wert, der zwischen 0,43 für Wohnungstyp #2 und 0,46 für Wohnungstyp #3 liegt.

Mit Hilfe der vorliegenden Kennzahlen lassen sich die unterschiedlichen Kurvenverläufe für die drei Wohnungstypen der *Bilder 4a bis 4h* qualitativ beschreiben. Bei geringen Windgeschwindigkeiten und niedrigen Außenlufttemperaturen dominiert der Einfluß von ipr . Demzufolge verhalten sich bei diesen Witterungsbedingungen auch die Wohnungen bezüglich ihrer Luftstromverteilung mit der Höhe über Grund *ähnlich* (s. *Tabelle 4*). Für Witterungsbedingungen, bei denen der Einfluß von ipr vernachlässigbar gering wird, zeigt sich, gemäß der Unterschiede der opr -Werte, auch eine Veränderung der Luftstromverteilung. Wie *Bild 4c* zeigt, weist der Wohnungstyp mit der geringsten Abweichung vom „Idealwert“ (hier Wohnungstyp #1) auch die geringste Höhenabhängigkeit für die Außenluftströme auf. Der Wohnungstyp #2 dagegen profitiert im unteren Teil des Gebäudes von den niedrigen Innendrücken des Treppenhauses und lehnt sich im oberen Teil des Gebäudes an die Kurve des Wohnungstyps #1 an. Bei der Betrachtung der absoluten Werte der Luftströme müssen allerdings auch die absoluten Werte der Durchlässigkeiten berücksichtigt werden. Für die windangeströmte Fassade beträgt das Verhältnis der Durchlässigkeiten für die Wohnungstypen #3 zu Wohnungstypen #1 etwa 3 : 1.

Für eine Windanströmung vom Hof her (s. *Bild 4g*) ergeben sich opr -Werte von 0,33 für den Wohnungstyp #1, 0,93 für Typ #2 und 0,70 für Typ #3. Da die Zweizimmerwohnungen für diese Windanströmrichtung keine angeströmte Außenfassade besitzen, ergibt sich folgerichtig auch keine Außenluftströme, ergiebt sich folgerichtig auch keine Außenluftströme. Die Situation kehrt sich für die Dreizimmerwohnungen bei einer Windrichtung vom Hof her gegenüber den vorher betrachteten Fällen gerade um. Wie das Beispiel zeigt, beschreibt der Kennwert opr die Durchströmung der Zonen mit Außenluft sehr gut, während der Kennwert ipr den Einfluß des thermischen Auftriebs widerspiegelt.

Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Werten

Luftwechselfmessungen in den nichtbewohnten Vergleichswohnungen der Wohnungstypen #2 und #3 im 3. Obergeschoß des fertiggestellten Gebäudes ergaben, daß die mit der zentralen Abluftanlage in den Bädern abgesaugten Luftströme im wesentlichen über die Wohnungstüren vom Treppenhaus her in die Wohnungen eindringen [6]. Damit ergibt sich selbst bei einem abgesaugten Luftstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ je Wohnung, der in etwa einem Luftwechsel von 0,25 ACH für die Dreizimmerwohnungen entspricht, in den Wohn- und Schlafräumen nur ein ungenügender Austausch mit Außenluft.

Wie dagegen die bereits vorgestellten Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen, ist jedoch bei der zugrundegelegten Durchlässigkeitsverteilung der vom Treppenhaus in die Wohneinheiten eindringende Luftstrom weitestgehend von der Lüftungsstrategie unabhängig. Auch Simulationsrechnungen mit einer geänderten Durchlässigkeitsverteilung ließen keine erhöhte Abhängigkeit der Luftstromverteilung im Treppenhaus von der Wahl der Lüftungsstrategie erkennen (s. *Tabellen 1.16* und *1.17* im Anhang).

Wie die Simulationsrechnungen darüber hinaus zeigten, ist die Luftstromverteilung für die einzelnen Wohnungstypen von der Höhenlage abhängig. Demzufolge erscheint es fraglich, ob Messungen in Vergleichswohnungen in nur einem Stockwerk

des Gebäudes, besonders wenn dieses in etwa in Höhe der neutralen Zone liegt, verallgemeinerungsfähige Ergebnisse liefern können.

Anders als bisher bei den Simulationsrechnungen angenommen, wurden in dem Wohnhaus jedoch real verschiedene Lüftungsstrategien verwirklicht. Diese decken sich weitestgehend mit den in der Aufgabenstellung beschriebenen maschinellen Lüftungssystemen. Allerdings werden all diese verschiedenen Lüftungsstrategien in dem Testhaus gleichzeitig betrieben. Weiterhin wurden in einer Wohnung die Fugendichtungen der Fenster zum Hof hin entfernt, um eine bessere Fugenlüftung zu gewährleisten. Die einzelnen Lüftungsstrategien sind in *Tabelle 5* zusammengefaßt.

Tabelle 5: Ausgeführte Lüftungsstrategien*)

O.G.	Wohnungstyp		
	#1	#2	#3
1.	DE	DE	DE
2.	DE	DE	BE
3.	DE	DE	DE
4.	DE	DE	DE
5.	DE	DE	ZA
6.	DE	ZA	BE

Legende:
 BE — Bedarfsentlüftung (Grundlast $30 \text{ m}^3/\text{h}$)
 DE — Dauerentlüftung (Grundlast $60 \text{ m}^3/\text{h}$)
 ZA — maschinelle Zu- und Abluft, nicht abgeglichen
 *) — zusätzliche Bedarfsentlüftungen nicht berücksichtigt

Um den Einfluß der Lüftungsanlagen auf die Luftstromverteilung im Gebäude genauer zu untersuchen, wurden nunmehr auch Simulationsrechnungen mit der Kombination der realisierten Lüftungsstrategien durchgeführt (s. *Bilder 4i bis 4k*). Die Ergebnisse zeigen für den Wohnungstyp #1 durchgehend höhere Luftströme vom Treppenhaus her und teilweise höhere Außenluftströme gegenüber der Verwirklichung einer einheitlichen Lüftungsstrategie im Gebäude. Auch für den Wohnungstyp #3 ergeben sich für die Wohnungen im 3. und 4. OG stets höhere Luftströme vom Treppenhaus her als bei den vorher untersuchten Lüftungsstrategien. Die Außenluftströme liegen für diese Wohnungen höher als bei Anwendung der reinen Bedarfsentlüftung, sind aber geringer als bei Dauerentlüftung aller Wohneinheiten. Die Luftstromverteilung für die Vergleichswohnungen wird also *negativ* von den unterschiedlichen Lüftungsstrategien beeinflusst. Dies trifft besonders für die Wohneinheiten zu, für die die Luftwechselfmessungen durchgeführt worden sind. Der für den Wohnungstyp #3 des 5. Obergeschosses erforderliche Außenluftwechsel wird durch die maschinelle Zu- und Abluftanlage, die hier als abgeglichen angenommen wurde, gewährleistet. Daraus ergeben sich kaum nennenswerte Luftmassenströme für die Fugenlüftung.

Bei geringerer Windgeschwindigkeit, ungleicher maschineller Abluftverteilung infolge ungenügenden Abgleichs, veränderter Windanströmrichtung sowie bei ungünstigerer Durchlässigkeitsverteilung erhöht sich der Effekt der negativen Beeinflussung der Luftstromverteilung infolge der gemischten Lüftungsstrategien nochmals.

Auswahl und Verteilung der unterschiedlichen Lüftungsstrategien bestimmen also die Luftstromverteilung in dem Testgebäude erheblich. Die gemessenen und beanstandeten Luftströme für die Vergleichswohnungen vom Treppenhaus her scheinen, wie man den Simulationsrechnungen entnehmen kann, von den Wissenschaftlern durch deren Auswahl und Kombination der Lüftungsstrategien selbst verursacht worden zu sein.

Bei dem vorliegenden Gebäude ist durch die geringen Strömungswiderstände zwischen den einzelnen Wohneinheiten eine enge Verknüpfung über das Treppenhaus gegeben. Dem-

zufolge stellt eine jede Lüftungsanlage eine Störgröße für die anderen Anlagen dar.

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Die Simulationsrechnungen haben gezeigt, daß in bezug auf die Luftdurchströmung der Wohnungstür als Strömungswiderstand gegen die thermischen Auftriebskräfte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Obgleich die Gesamtdurchströmung des Gebäudes bei Variation der Durchlässigkeit der Wohnungstüren nur unwesentlichen Änderungen unterworfen ist (s. *Tabelle 3*), wird durch sie die Luftstromverteilung bestimmt [4]. Wohnungen mit einem kleinen Innenwand-Durchlässigkeits-Verhältnis (*ipr*), d.h. großen Strömungswiderständen zum Schacht hin, und einem Außenwand-Durchlässigkeits-Verhältnis (*opr*) nahe dem Idealwert ($opr = 0,5$) bieten die besten Voraussetzungen für eine effektive Fugenlüftung. Dies zeigt, daß besonders für Mehrfamilienhäuser die Grundrißgestaltung eine wesentliche Einflußgröße für den Luftaustausch mittels natürlicher Lüftung darstellt. Um den Einfluß der thermischen Auftriebskräfte zu reduzieren, sollten weiterhin die Treppenhäuser nicht beheizt werden. Um später Bauschäden und hohe Transmissionswärmeverluste zum Treppenhaus hin zu vermeiden, muß dies bereits bei der Planung des Gebäudes berücksichtigt werden.

Reine Abluftanlagen bergen, besonders wenn sie einzeln betrieben werden (Bedarfsentlüftung), bei undichten Verbindungen über das Treppenhaus nach außen hin die Gefahr der exzessiven Nachströmung von Luft aus dieser Richtung, was in der Regel mit Geruchsbelästigungen verbunden ist. Die Luftdurchlässigkeit der Fassaden ist so zu gestalten, daß ein Nachströmen der Luft von außen her in die Wohnungen gewährleistet ist. Der Einsatz von Abluftanlagen reduziert, wegen der nichtlinearen Abhängigkeit des eindringenden Luftvolumenstromes von der treibenden Druckdifferenz, den Infiltrationsanteil an der Außenluft. Bei zentralen Abluftanlagen bietet sich die Wärmerückgewinnung mittels einer Wärmepumpe in Verbindung mit der Brauchwassererwärmung an.

Abgeglichene Be- und Entlüftungsanlagen verändern das Druckniveau einer Zone nicht. Demzufolge ist die Einflußnahme der Anlage auf benachbarte Zonen nicht zu befürchten, und der Infiltrationsluftstrom verändert sich nicht gegenüber der reinen Fugenlüftung. Bei einer richtig dimensionierten Be- und Entlüftungsanlage handelt es sich bei dem Infiltrationsluftstrom aber um einen über den Erfordernissen liegenden Luftstrom, der keine wesentliche Verbesserung der Luftqualität mit sich bringt, aber den Heizenergieverbrauch nachhaltig beeinflussen kann (vgl. *Bild 3*). Deshalb sollte bei Anwendung dieser Lüftungsstrategie auf besonders dichte Umschließungsflächen geachtet werden.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, wie komplex die Voraussage über die Luftstromverteilung innerhalb eines Gebäudes ist. Weiterhin wurde die Abhängigkeit der Luftstromverteilung von verschiedenen Störgrößen aufgezeigt. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, bereits in der Planungsphase eines meßtechnisch ausgerichteten Forschungsvorhabens eine Parameterstudie durchzuführen.

Danksagung

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-AC03-76SF00098 gefördert.

Für die Durchsicht der Arbeit möchten sich die Autoren bei Dipl.-Ing. *Hans Erhorn* vom Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart, Dr.-Ing. *Jürgen Wegner* vom Bundesgesundheits-

amt in Berlin und Professor Dr. *Christoph Zürcher* von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich recht herzlich bedanken. Die zahlreichen Anregungen haben der Arbeit entscheidende Impulse gegeben. [H 978]

Literaturangaben

- [1] DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Teil 1: Grundlagen der Berechnung. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin (1983).
- [2] VDI 2067 E: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen. Blatt 1: Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen. Blatt 2: Raumheizung. VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1979).
- [3] *Feustel, H. E., u. V. M. Kendon*: Infiltration Models for Multicellular Structures — A Literature Survey. Energy and Buildings Vol. 8 (1985) Nr. 2, S. 123/36.
- [4] *Feustel, H. E.*: Beitrag zur theoretischen Beschreibung der Druck- und Luftmassenstromverteilung in natürlich und maschinell gelüfteten Gebäuden. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 151, Düsseldorf (1984).
- [5] Lüftung im Wohnungsbau. Konzeption eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms. Dornier System GmbH, Friedrichshafen (1978).
- [6] *Nikolic, V., u. L. Rouvel*: Vergleich des Wärmebedarfs bei unterschiedlicher Lüftung — Untersuchungen in einem Berliner Mehrfamilienwohnhaus. In: „Lüftung im Wohnungsbau“, Tagungsbericht, Verlag TÜV Rheinland (1984).
- [7] *Jahn, A.*: Das Test-Referenzjahr. Eine Sammlung stündlicher Werte interessierender Wetterelemente. Teil 2: Ein Test-Referenzjahr für Berlin. HLH Heizung Lüftung/Klima Haustechnik 28 (1977) Nr. 7, S. 257/65.
- [8] *Zuranzki, J.*: Windbelastung von Bauwerken und Konstruktionen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld (1969).
- [9] *Wolfseher, U., u. K. Gertis*: Bodennahe Aerodynamik. Teil 1: Beschreibung des natürlichen Windes in Bodennähe. GI Gesundheits-Ingenieur 99 (1978) Nr. 9, S. 259/74; Teil 2: Simulation von bodennahen Windströmungen, Umströmung von Gebäuden und Gebäudegruppen. GI Gesundheits-Ingenieur 99 (1978) Nr. 11, S. 321/32.
- [10] *Feustel, H. E., Ch. Zürcher, R. C. Diamond, J. B. Dickenson, D. T. Grimsrud u. R. Ripschutz*: Temperature- and Wind-Induced Air Flow Patterns in a Staircase Computer Modelling and Experimental Verification. Energy and Buildings Vol. 8 (1985) Nr. 2, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL # 14589 (1985).
- [11] *Krischer, O., u. H. Beck*: Die Durchlüftung von Räumen durch Windangriff und der Wärmebedarf für die Lüftung. VDI-Berichte 18 (1957) S. 29/56.
- [12] *Hussain, M., u. B. L. Lee*: An Investigation of Wind Forces on Three-Dimensional Roughness Elements in a Simulated Atmospheric Boundary Layer. Department of Buildings Science Report, University of Sheffield (1980).
- [13] *Feustel, H. E., u. Th. P. Lenz*: Patterns of Infiltration in Multifamily Buildings. Building and Environment Vol. 20 (1985) Nr. 1, S. 7/14.
- [14] *Sherman, M. H.*: Variability in Residential Air Leakage. Tagungsunterlagen, Symposium on Measured Leakage Performance of Buildings, ASTM, Philadelphia (1984).
- [15] Luftwechsellmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter Einfluß von Konstruktions-, Klima- und Benutzerparametern. EMPA-Bericht Nr. 36 630, Bericht II (1977).
- [16] *Gertis, K.*: Raumluftfeuchte und Wohnungslüftung. In: „Lüftung im Wohnungsbau“ Tagungsbericht, Verlag TÜV Rheinland (1984).
- [17] Indoor Climate. NKB-Report Nr. 41 (1981).
- [18] ASHRAE-Standard 62-1981: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA (1981).
- [19] *Erhorn, H., u. K. Gertis*: Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel? GI Gesundheits-Ingenieur 107 (1968) H. 1, S. 12/14 u. 71/76.
- [20] *Lenz, Th.*: Berechnung der Jahresheizarbeit für Lüftung in mehrgeschossigen Wohnhäusern. Studienarbeit am Hermann-Rietschel-Institut der Technischen Universität Berlin (1983) unveröffentlicht.
- [21] *Hekmat, D., H. E. Feustel u. M. P. Modera*: Belüftung von Wohngebäuden: Einfluß verschiedener Lüftungsstrategien auf den Energieverbrauch und die Raumluftqualität von Einfamilienhäusern. HLH Heizung Lüftung/Klima Haustechnik 36 (1985) Nr. 9, S. 450/57.
- [22] *Esdorn, H., u. W. Brinkmann*: Der Lüftungswärmebedarf von Gebäuden unter Wind- und Auftriebseinflüssen. GI Gesundheits-Ingenieur 99 (1978) Nr. 4.
- [23] *Feustel, H. E.*: Development of a Simplified Multizone Infiltration Model. Proceedings, 6th AIC-Conference "Ventilation Strategies and Measurement Techniques", Het Meerdal, Netherlands (1985), Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-Report # 19095 (1985).

Belüftung (Anhang)

Tabelle I.1: Luftvolumenströme für Fugenlüftung
Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	49,7	0	62,1	0	55,3
2.	0	22,6	0	39,0	0	35,2
3.	17,0	8,8	0	2,7	4,6	6,8
4.	43,8	0	34,1	0	36,4	0
5.	63,4	0	54,9	0	55,9	0
6.	80,0	0	72,3	0	72,4	0

Tabelle I.2: Luftvolumenströme für Fugenlüftung
Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	5,0	34,0	0	53,9	0	54,3
2.	20,1	28,8	0	40,2	0	43,7
3.	32,5	24,8	0	25,8	0	32,0
4.	42,2	25,2	0	18,8	4,1	25,8
5.	51,2	25,4	0	8,4	14,0	19,8
6.	59,7	25,3	10,6	0	23,1	14,1

Tabelle I.3: Luftvolumenströme für Fugenlüftung
Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	19,8	27,2	0	39,1	0	41,8
2.	29,3	24,8	0	31,4	0	35,7
3.	32,2	23,3	0	24,6	0	30,2
4.	36,5	25,8	0	26,7	0	33,0
5.	40,6	28,0	0	28,0	0	35,0
6.	44,7	29,7	0	28,7	0	36,3

Tabelle I.4: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage,
Grundlast $30\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	76,5	0	89,8	0	81,5
2.	0	53,3	0	68,3	0	60,0
3.	17,9	18,9	0	40,1	4,0	31,9
4.	44,0	12,1	30,5	0	33,6	9,0
5.	65,1	3,3	56,2	0	58,9	0
6.	84,6	0	75,3	0	77,2	0

Tabelle I.5: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage,
Grundlast $30\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	10,5	41,1	0	82,5	0	73,0
2.	25,6	37,0	0	70,0	0	63,1
3.	38,0	33,8	0	57,4	0	52,0
4.	48,2	34,6	0	51,7	8,7	47,3
5.	57,4	35,0	0	44,4	17,0	43,1
6.	66,0	35,2	0	34,7	24,9	38,9

Tabelle I.6: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage
Grundlast $30\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	22,8	35,8	0	70,6	0	62,5
2.	29,5	33,9	0	63,9	0	57,0
3.	35,6	32,7	0	58,3	0	52,1
4.	40,6	35,2	0	60,1	0	54,5
5.	45,3	37,2	0	61,1	0	56,0
6.	49,7	39,0	0	61,7	1,8	56,8

Tabelle I.7: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage
Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	101,3	0	116,0	0	105,8
2.	0	79,2	0	95,2	0	85,2
3.	14,0	46,0	0	69,0	4,8	55,2
4.	44,9	21,5	24,3	35,7	33,7	33,6
5.	66,8	16,5	50,8	9,2	55,6	17,0
6.	85,2	10,3	75,0	0	77,6	0

Tabelle I.8: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage
Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	4,3	55,8	0	110,4	0	90,4
2.	26,9	44,1	0	98,5	0	81,1
3.	40,9	41,8	0	86,9	5,5	70,2
4.	52,2	43,0	0	81,7	13,9	67,2
5.	62,2	43,8	0	75,3	21,6	64,0
6.	71,2	44,3	0	67,4	28,9	60,6

Tabelle I.9: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage
Grundlast $60\text{ m}^3/\text{h}$. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10^\circ\text{C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	21,1	42,5	0	99,3	0	80,5
2.	29,8	41,2	0	93,1	0	75,3
3.	37,1	40,5	0	88,0	3,3	70,3
4.	43,3	43,1	0	89,6	4,8	72,6
5.	48,8	45,3	0	90,6	6,5	74,2
6.	53,9	47,1	0	91,1	8,4	75,3

Tabelle I.10: Luftvolumenströme für Fugenlüftung. Windanströmrichtung vom Hof ($t_a = -14^\circ\text{C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	#1		#2		#3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	58,5	16,1	0	0	26,3
2.	0	54,7	25,8	0	6,2	24,5
3.	0	52,0	34,5	0	14,6	23,5
4.	0	54,7	44,2	0	22,0	25,2
5.	0	56,8	52,8	0	28,4	26,6
6.	0	58,5	60,7	0	34,2	27,8

Tabelle I.11: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast 30 m³/h. Windanströmrichtung vom Hof ($t_a = -14\text{ °C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	72,2	4,5	25,5	0	39,8
2.	0	68,9	16,9	13,1	8,0	28,4
3.	0	66,3	29,2	0,8	18,5	27,8
4.	0	69,0	42,6	0	27,3	29,6
5.	0	70,6	52,8	0	34,6	31,2
6.	0	72,4	61,7	0	41,0	32,5

Tabelle I.15: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 10\text{ °C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	34,4	45,8	0	96,0	0	80,4
2.	40,9	44,1	0	89,1	0	66,4
3.	46,9	43,2	0	83,5	10,1	68,7
4.	51,8	46,4	0	86,2	10,2	72,0
5.	56,4	49,0	0	88,1	0	12,0
6.	60,7	51,2	0	32,8	0	60,1

Tabelle I.12: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage, Grundlast 60 m³/h. Windanströmrichtung vom Hof ($t_a = -14\text{ °C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	90,0	4,8	55,2	0	66,8
2.	0	82,6	14,8	42,3	4,2	55,9
3.	0	78,3	24,2	35,8	14,4	45,6
4.	0	81,1	35,6	24,4	27,0	33,0
5.	0	82,9	46,5	13,5	37,9	34,9
6.	0,6	83,8	57,4	2,6	45,7	36,5

Tabelle I.16: Luftvolumenströme für Fugenlüftung. Durchlässigkeiten für Treppenhausfenster um Faktor 10 vergrößert, Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14\text{ °C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	100,9	0	131,3	0	109,5
2.	0	56,6	0	87,7	0	69,3
3.	15,3	9,6	0	29,0	0	19,9
4.	68,4	0	51,8	0	53,6	0
5.	102,7	0	91,9	0	88,4	0
6.	131,9	0	124,9	0	117,2	0

Tabelle I.13: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14\text{ °C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	96,2	0	110,9	0	100,9
2.	0	72,4	0	89,3	0	64,1
3.	21,9	38,1	1,5	58,5	13,8	46,2
4.	51,1	20,0	32,0	28,0	39,9	28,8
5.	71,7	14,6	58,1	2,0	0	0
6.	89,8	8,0	48,6	0	62,1	0

Tabelle I.17: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluftanlage. Durchlässigkeiten für Treppenhausfenster um Faktor 10 vergrößert, Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = -14\text{ °C}$, $v_{10} = 2\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	0	138,7	0	171,2	0	145,3
2.	0	102,7	0	133,8	0	111,4
3.	2,2	57,8	0	90,7	0	71,2
4.	71,9	12,9	22,2	37,8	43,5	26,0
5.	125,1	0	104,1	0	108,2	0
6.	159,8	0	145,8	0	144,0	0

Tabelle I.14: Luftvolumenströme für Fugenlüftung und Abluft gemäß Tab. 5. Windanströmrichtung von der Straße ($t_a = 0\text{ °C}$, $v_{10} = 4\text{ m/s}$)

O.G.	Wohnungstyp					
	# 1		# 2		# 3	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
1.	21,7	48,6	0	106,4	0	89,5
2.	36,5	45,2	0	93,8	0	70,1
3.	48,7	42,7	0	81,1	12,5	66,7
4.	58,9	44,1	0	75,8	19,7	64,4
5.	68,0	45,1	0	68,9	0	0
6.	76,6	45,7	0	6,8	0	38,5