

Luftdurchlässigkeit der Fenster und Druckverteilung im Gebäude

Dr.-Ing. Horst Esdorn, Ludwigshafen a. Rh.

Hochhäuser sind wegen der starken Zunahme der Windgeschwindigkeiten mit der Höhe, wegen ihrer ungeschützten Lage und wegen der möglichen Auftriebswirkungen im besonderen Maße empfindlich gegen Undichtigkeiten ihrer Außenhaut (Wärmeverluste, Behaglichkeitsminderung). Sämtliche für das BASF-Hochhaus angebotenen Fenster wurden daher zunächst Dichtigkeitsprüfungen unterzogen. Über die Ergebnisse dieser Messungen wird im folgenden berichtet. Daran anschließend werden Überlegungen zu den möglichen Auswirkungen geöffneter Fenster wiedergegeben.

Luftdurchlässigkeit der Fenster

Untersuchungen über die Luftdurchlässigkeit von Fenstern sind bereits in großer Zahl durchgeführt worden (siehe [2] bis [9]). Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse, die I. S. Cammerer 1938 veröffentlicht hat [8], ergibt im wesentlichen:

1. Die Richtung des Luftdurchganges ist ohne Einfluß (Ausnahme: Schiebefenster).
2. Labormessungen haben ausreichende Ähnlichkeit mit Messungen an längere Zeit eingebauten Fenstern.
3. Bestes Bezugsmerkmal für die Verallgemeinerung von Ergebnissen ist die Fugenlänge.
4. Die von Reiher, Fraß und Settele [6] an Fugenmodellen ermittelte Abhängigkeit des Luftdurchgangs V_L von der Druckdifferenz ΔP

$$V_L = \text{const} \cdot \Delta P^{\frac{2}{3}}$$

wird von den meisten Messungen gut erfüllt.

5. Verbundfenster haben in der Regel größere Undichtigkeiten als Einfachfenster (Herstellungsgenauigkeit).

Auf Grund der angegebenen Veröffentlichungen ist festzustellen, daß wegen der mannigfachen Einflüsse, die von der Art der Verschußbetätigung bis zum Werkstoff reichen, immer nur eine grobe Abschätzung des Luftdurchgangs möglich ist. Dabei muß mit Unsicherheiten von $\pm (200-500)\%$ gerechnet werden. Der beste Weg zu genaueren Ergebnissen führt wie im vorliegenden Falle über die Prüfung der speziell vorgesehenen Fensterkonstruktionen. Das ist jedoch nur bei sehr großen Objekten wirtschaftlich vertretbar (hier 1200 Fenster).

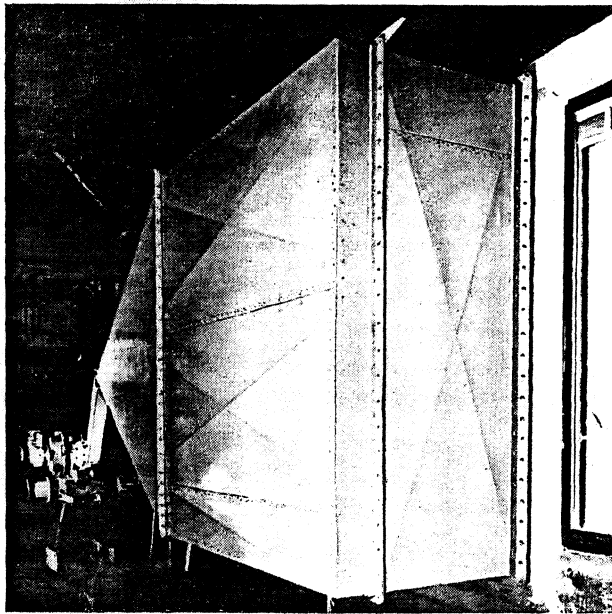
Versuchsanlage

Die zu prüfenden Fenster waren normal in einen für Untersuchungen an der Hochhaus-Klimaanlage errichteten Modellraum eingesetzt, vor dessen einem Fenster, wie in Abbildung 193 gezeigt, ein Windkanal errichtet wurde. Abbildung 194 gibt die Anordnung schematisch wieder. Der Differenzdruck wurde in den vier Ecken und in der Fenstermitte gemessen. Die Meßstellen wurden einzeln oder gemeinsam über einen Verteiler auf ein Schrägrohrmanometer oder ein Miniskop geschaltet. Ein parallelgeschaltetes normales U-Rohr diente zur Gebläseinstellung und zur Bereichswahl der Feinmeßgeräte.

Meßergebnisse

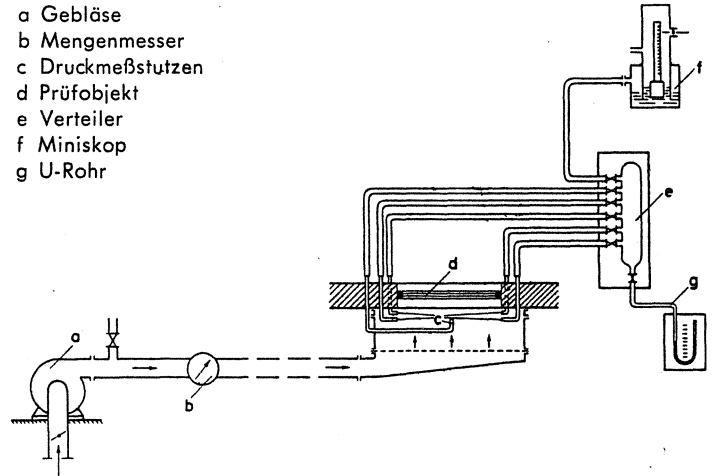
Insgesamt wurden sechs verschiedene Fenstertypen untersucht, von denen fünf Fenster gleicher Art waren (Wendeflügel Fenster); sie unterschieden sich nur in bezug auf Werkstoff und Herstellerfirma. Nach dem damaligen Stand der Planung waren diese fünf Fenster Verbundfenster mit Wendeflügel und innenlaufendem Lamellen Sonnenstore. Zur Wahl standen zwei Ausführungen in Stahl und je eine in Holz, Gußeisen und Aluminium. Das Leichtmetallfenster, das infolge notwendiger Stahlversteifungen übrigens das gleiche Gewicht besaß wie die Stahlfenster, hatte als einziges eine Gummidichtung in der Anschlagfläche. Mit Ausnahme des Holzfensters, das als Konstruktion mit Hebe-Wendeflügel ohnehin etwas abweichend war, hatten alle eine um etwa $\frac{1}{6}$ der Fensterbreite aus der Mitte verschobene Drehachse. Die Abbildungen 196 bis 201 zeigen die untersuchten Konstruktionen. Gewählt wurde nachträglich ein nicht zu öffnendes Leichtmetallfenster mit einer schmalen Lüftungsklappe (Abb. 201), die eine Mipolam-Dichtung hat. Die Überlegungen, die zu dieser Wahl führten, werden weiter unten dargestellt. Zwei aus der Lieferung genommene Fenster dieser Type wurden unter den gleichen Bedingungen wie die anderen geprüft.

Die Messungen erfolgten für alle Fenster in beiden Strömungsrichtungen. Als Druckmeßbereich wurde mit Rücksicht auf mögliches Abheben der Dichtfalze bei den zu erwartenden Spitzenwindgeschwindigkeiten 0–100 mm WS gewählt. Das Einsetzen aller Fenster erfolgte durch die Herstellerfirmen. Die Dichtflächen der Stahlfenster wurden von den Monteu-



193 Windkanal für die Fensterprüfung

- a Gebläse
- b Mengemesser
- c Druckmeßstutzen
- d Prüfobjekt
- e Verteiler
- f Miniskop
- g U-Rohr

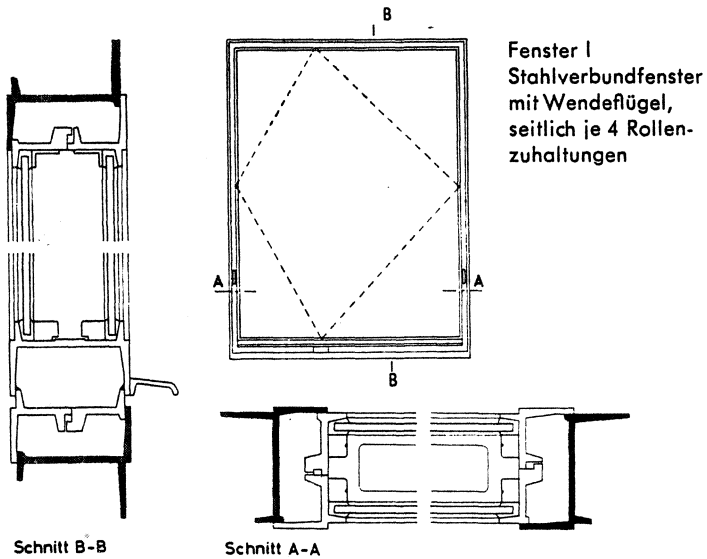


194 Meßanordnung

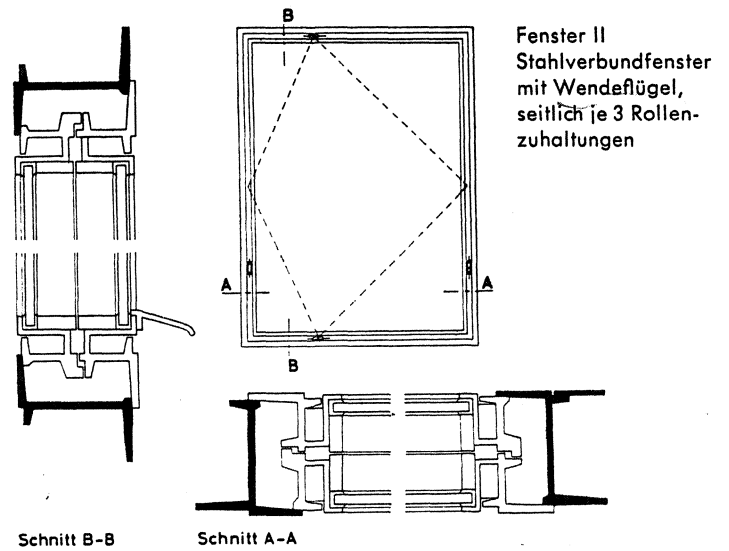
Type of window		I	II	III	IV	V	VI
Fens	Material	Steel	Steel	Cast iron	Al with rubber seals	Wood	Aluminium
wt	wt with glass (kg)	184	180	244	181	99	114
ver	Total Area (m²)	2,98	3,16	3,40	3,48	3,16	3,16
	Glass Area (m²)	2,48	2,74	2,58	2,63	2,30	2,64
Gew	Glass/total Area	0,83	0,87	0,76	0,75	0,73	0,84
Gest	Length of joint (m)	6,63	6,92	6,87	6,96	6,58	3,17
Glas	Length of joint/total area (1/m)	2,22	2,19	2,02	2,00	2,08	1,00
Gest	Pressure difference applied - five (mm WS)	$2 \leq \Delta P < 100$	$2 \leq \Delta P \leq 109$	$2 \leq \Delta P \leq 20$	-	$1 \leq \Delta P \leq 100$	a) $1 \leq \Delta P \leq 40$ *) b) $2 \leq \Delta P \leq 100$
Übe	Leakage/m² of opening joint ($\frac{\text{Nm}^3}{\text{hm}(\text{mm WS})^n}$)	0,56	1,44	2,14	-	0,73	a) 0,62 b) 0,27-0,44
Diffe	Leakage/m² of glass area ($\frac{\text{Nm}^3}{\text{hm}^2(\text{mm WS})^n}$)	1,23	3,15	4,32	-	1,51	a) 0,62 b) 0,27-0,44
Spez	Pressure diff applied - five (mm WS)	$2 \leq \Delta P < 35$	$2 \leq \Delta P \leq 6$	$2 \leq \Delta P \leq 100$	$2 \leq \Delta P \leq 40$	$1 \leq \Delta P \leq 100$	a) $1 \leq \Delta P \leq 50$ b) $1 \leq \Delta P \leq 20$
je 1 r	($\frac{\text{Nm}^3}{\text{hm}(\text{mm WS})^n}$)	0,59	1,50	1,86	0,34	0,73	a) 0,50 b) 0,27-0,44
Spez	($\frac{\text{Nm}^3}{\text{hm}^2(\text{mm WS})^n}$)	1,31	3,29	3,76	0,67	1,51	a) 0,50 b) 0,27-0,44
je 1 r	Exposure, in (eq. 12)	0,70	0,67	0,63	0,65	0,78	a) 0,65 b) 0,65
Spez	Influence of opening (%)	$\pm 5\%$	$\pm 6\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 25\%$	$\pm 0\%$
je 1 r							
Expc							
Öffnungseinfluß (%)		$\pm 5\%$	$\pm 6\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 25\%$	$\pm 0\%$

*) a und b sind zwei aus der Serie genommene Fenster des gleichen Typs.

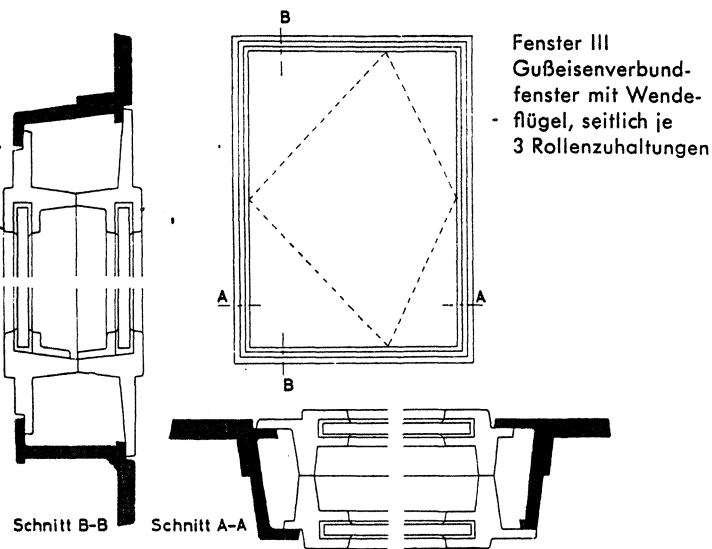
195 Luftdurchlässigkeit der untersuchten Fenster



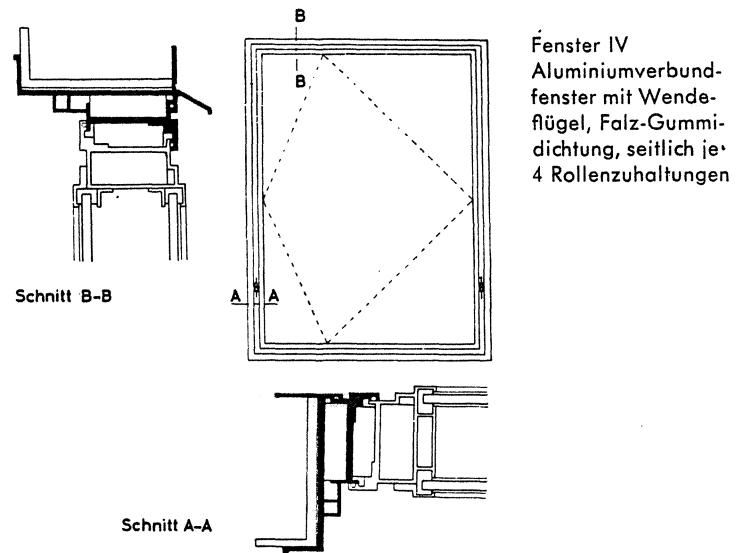
196



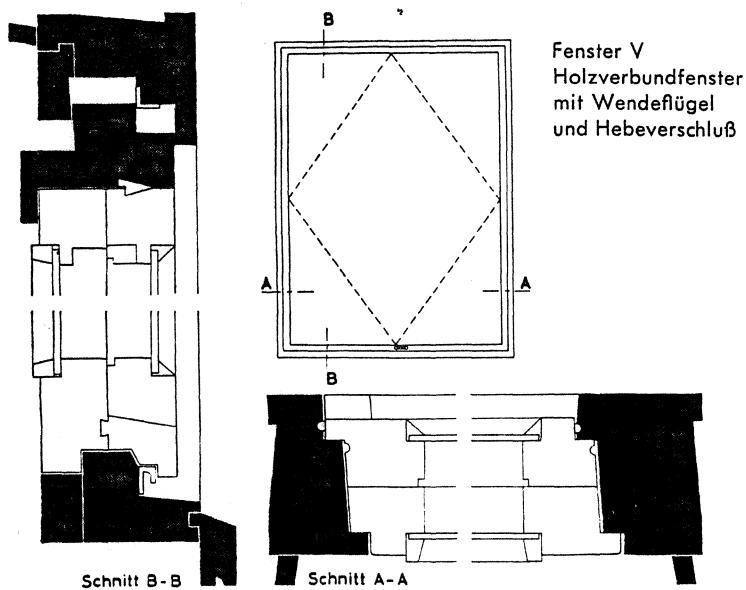
197



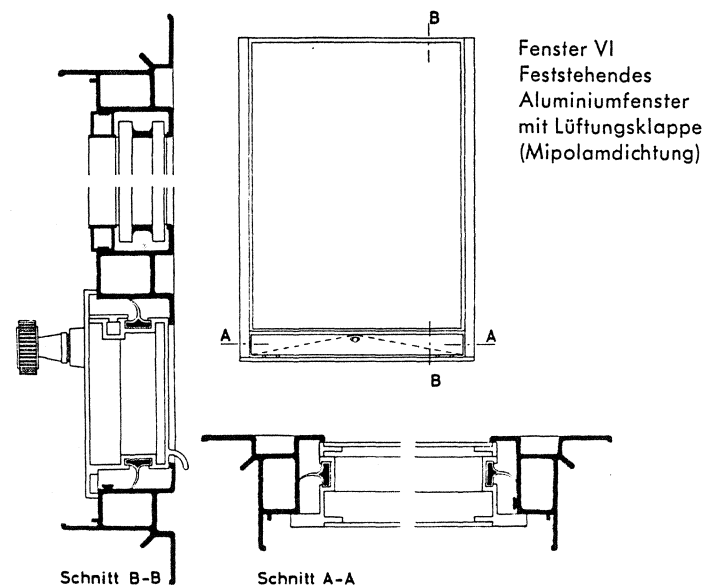
198



199



200



201

196-201 Die untersuchten Fenster, Ansichten 1:50 und Schnitte 1:5

ren nach dem Einbau auf etwa 0,1–0,2 mm nachgerichtet. Ein Fenster wurde vor und nach dem Richten gemessen. Der Einfluß dieser Arbeit ist von Interesse, da sie am Bau entweder gar nicht oder nur mit wesentlich geringerer Sorgfalt vorgenommen werden dürfte.

Die Meßergebnisse wurden nach der bekannten Beziehung

$$V_L = a \cdot l \cdot \Delta P^n \quad (1)$$

ausgewertet.

Darin bedeuten:

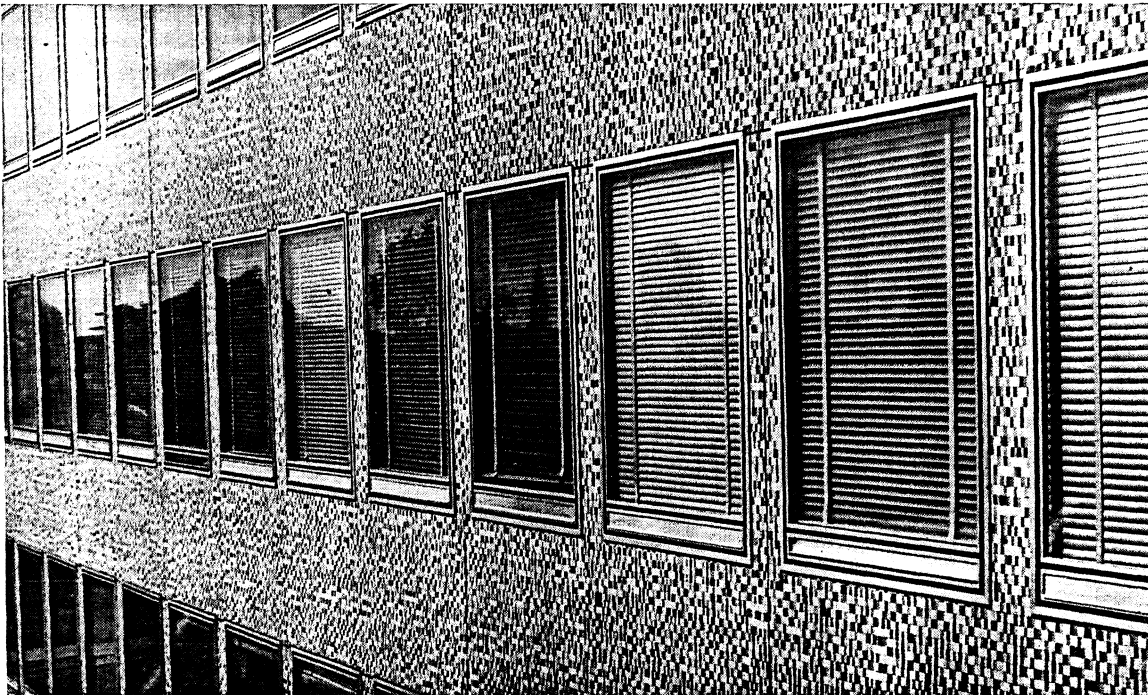
- V_L durchgehende Luftmenge je Stunde
- a spezifische Luftdurchlässigkeit, bezogen auf 1 m Fugenlänge
- l Fugenlänge
- ΔP Druckdifferenz
- n empirischer Exponent

Tabelle 195 enthält die Meßergebnisse. Darin ist u. a. der Druckbereich bezeichnet, in dem sich die Ergebnisse durch eine einfache Potenzfunktion darstellen lassen. Die Einflüsse mehrfachen Öffnens und Schließens zwischen verschiedenen Messungen sind in Prozenten angegeben. Die einzelnen Meßpunkte enthalten die Abbildungen 203 und 204. Mit Ausnahme des Holzfensters, das einen Hebeverschluß hatte, wurde der Ansatz der Gl. (1) mit $n = 2/3 = 0,67$, wie ihn Reiher erstmals auf Grund seiner Meßergebnisse vorschlug, sehr gut von allen Messungen bestätigt, und zwar auch erheblich über den bisher meist untersuchten Druckbereich (bis 10 mm WS) hinaus. Die teilweise starken Abweichungen von der Potenzfunktion bei hohen Differenzdrücken sind auf das Abheben der Falze (z. T. infolge der unsymmetrischen Achslage) zurückzuführen;

die geringen Differenzen zwischen den Durchlässigkeiten bei Über- und Unterdruck außen sind bei allen Fenstern in gleicher Weise erklärbar. Die Art des Schließens bewirkte deutlich sichtbare Streuungen. Bedenklich große Unterschiede (etwa 1:3!) ergaben sich bei Fenster II durch das Richten. Der wechselnde Grad der Sorgfalt bei der Montage stellt also einen bedeutenden Unsicherheitsfaktor für die Dichtigkeit von Stahlfenstern dar.

Die festgestellten Absolutwerte der Durchlässigkeit sind – gemessen am heutigen Entwicklungsstande – gut für die Fenster I, IV und V, normal für Fenster II und merklich unter dem Durchschnitt für Fenster III. Die feststehenden Fenster mit mīpolamgedichteter Lüftungsklappe sind absolut gesehen sehr gut. (Nach DIN 4701 [12] sind für Stahl-Verbundfenster mittlerer Güte Werte von $a = 1,5$ anzunehmen.) Die niedrigste Durchlässigkeit für Stahl-Verbundfenster ohne Gummidichtung wurde bisher von Dürr [9] mit $a = 0,36$ gemessen, die höchste von Sigwart [7] mit $a = 3,6$. Rechnet man bei den hier behandelten Messungen auch das ungerichtete Stahlfenster mit, so ergibt sich die gleiche erhebliche Schwankungsbreite von etwa 1 : 10 wie bei den Werten der Literatur.

Alle untersuchten beweglichen Fenster besaßen keine ausreichenden Arretierungsmöglichkeiten. Besonders jedoch wegen der mangelnden Steifigkeit bei aufgeklapptem Verbundflügel – z. B. beim Putzen der inneren Scheiben – erwiesen sie sich bei der geforderten Größe als mechanisch äußerst bedenklich. In mechanischer Hinsicht ließ sich allenfalls das Holzfenster vertreten. Diese Feststellungen waren neben anderen, weiter unten behandelten Gesichtspunkten mitentscheidend für die Wahl feststehender Fenster.



202 Die eingebauten Fenster

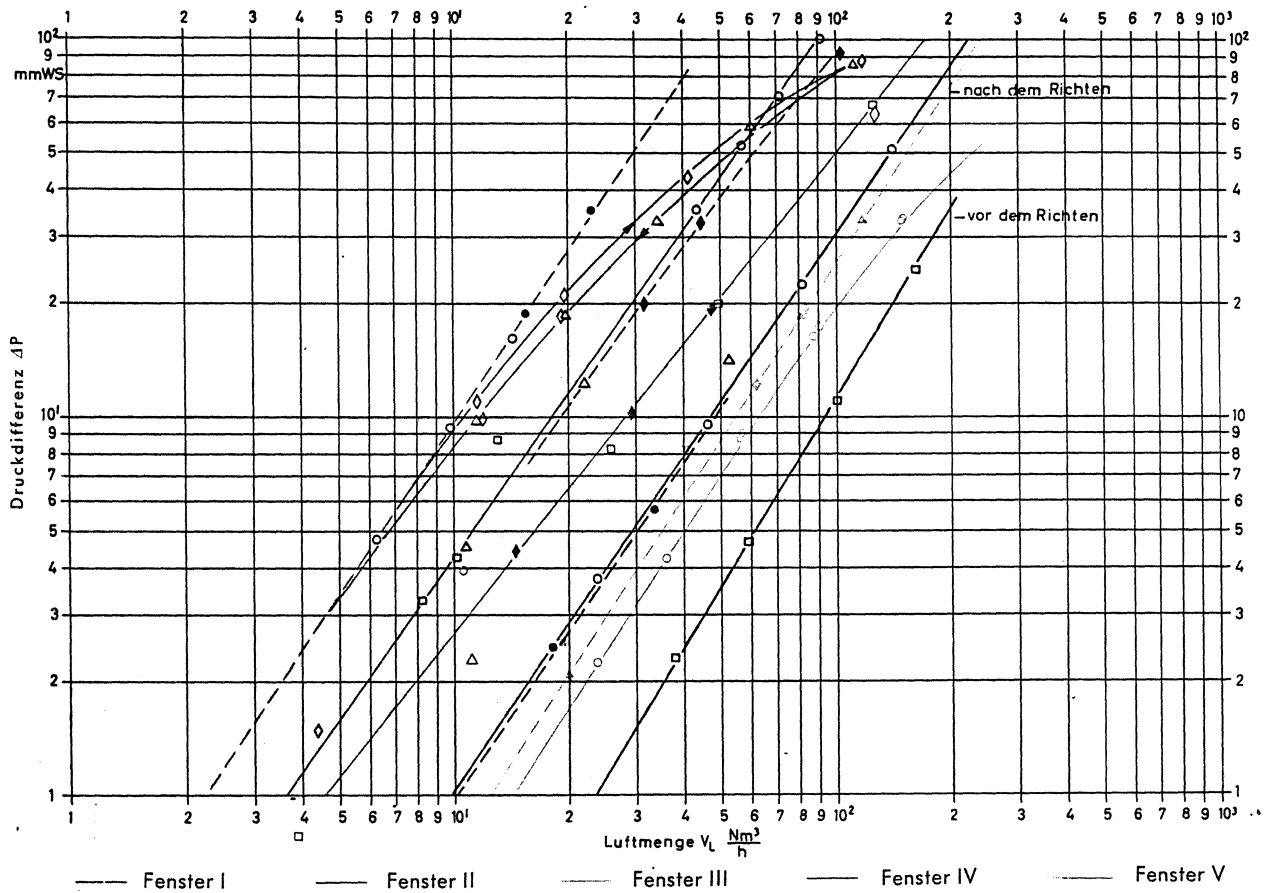
Überdruck außen

○ △ ◇ □

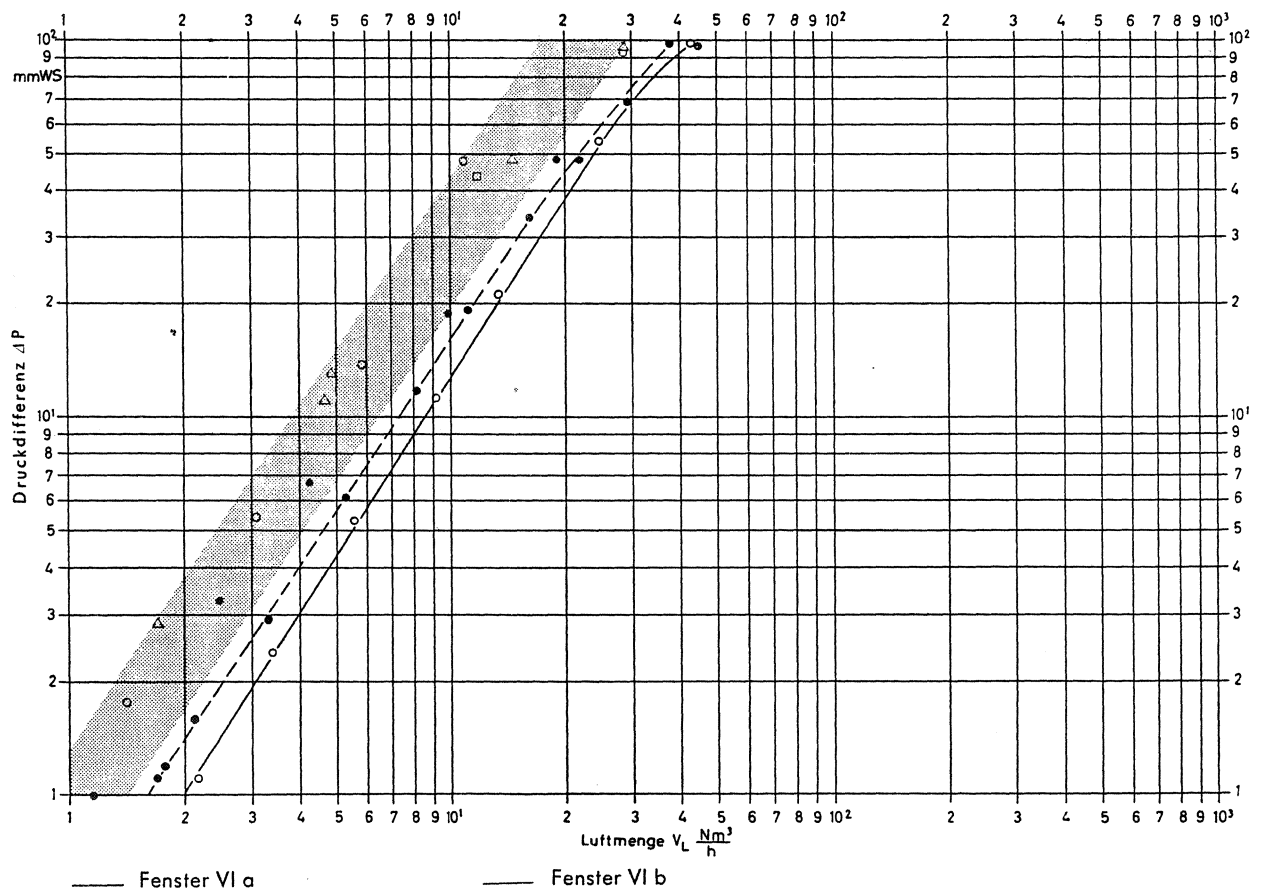
Unterdruck außen

● ▲ ◆ ■

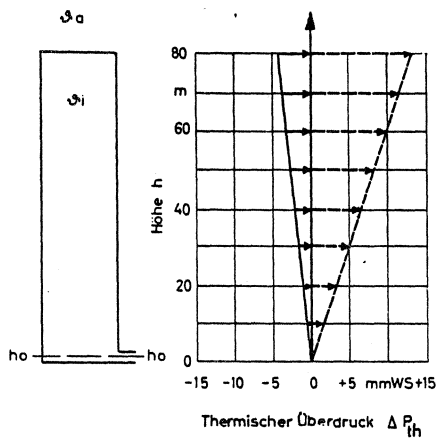
Gleich gezeichnete Meßpunkte gelten für Zustände, zwischen denen der Fenster-
verschluß nicht betätigt wurde



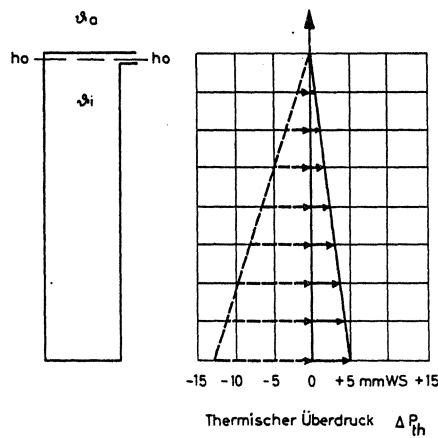
203 Gemessener Luftdurchgang durch die Fenster



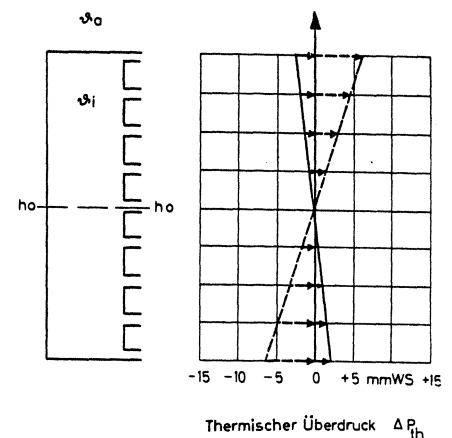
204 Gemessener Luftdurchgang durch das verwendete Fenster (zwei Stücke aus der Serienfertigung)



a) Öffnung nur am Fuß des Schachtes



b) Öffnung nur am Kopf des Schachtes



c) Öffnungen gleichmäßig über die Höhe verteilt

--- Winter: Innentemperatur $\theta_i = +20^\circ \text{C}$, Außentemperatur $\theta_a = -15^\circ \text{C}$
 — Sommer: Innentemperatur $\theta_i = +20^\circ \text{C}$, Außentemperatur $\theta_a = +32^\circ \text{C}$

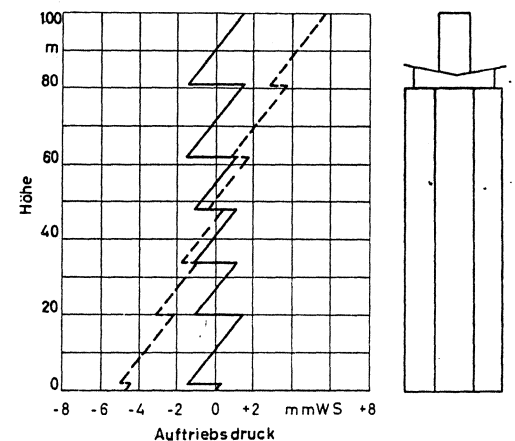
205 Thermische Überdrücke in einem senkrechten Schacht ohne Strömungsverluste bei verschiedenen Temperaturdifferenzen und Öffnungsverteilungen

Im BASF-Hochhaus sind die Treppenhäuser in sechs Zonen von etwa 16 m Höhe (Abb. 206) unterteilt. Fahrstuhl- und Installationsschächte haben gut dichtende Türen zu den Geschossen bzw. Treppenhäusern.

Auftriebswirkungen bei Gebäuden mit Lüftungsanlage

Bei zentralen Lüftungsanlagen in Hochhäusern bereiten die Auftriebsdrücke in den großen vertikalen Luftschächten besondere Schwierigkeiten, da sie die Luftmengenverteilung empfindlich stören und die Druckdifferenzen zwischen Geschossen und Außenluft unerwünscht beeinflussen können.

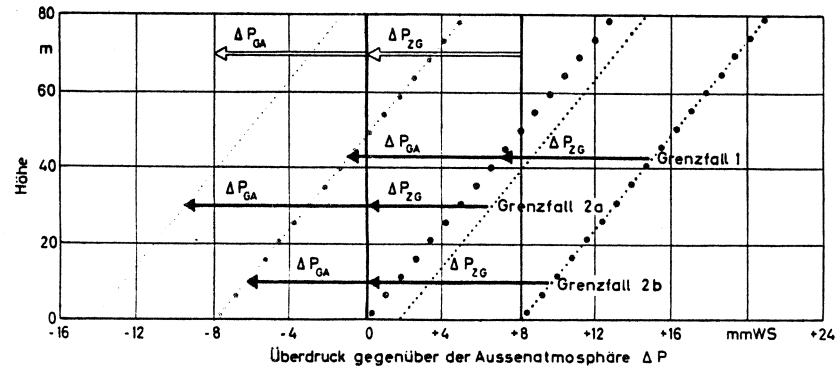
Am besten beherrscht man auch hier die Verhältnisse, wenn die Außenhaut durch feststehende Fenster möglichst dicht ist. Hinsichtlich Auftrieb optimale Luftführung: Zu- und Abluftsystem in gleicher Höhe ansaugend bzw. ausblasend. Günstigster Grenzfall 1: völlig dichte Außenhaut, Zu- und Abluftgebläse in gleicher Höhe (z. B. Abb. 208 für unten liegende Gebläse). Die Luftverteilung wird nicht gestört, und in den Geschossen gibt es keine Auftriebswirkungen, da in den Treppenhäusern und Geschossen gleicher Druckverlauf herrscht. Bei oben liegenden Gebläsen sind die Verhältnisse ähnlich, nur herrscht im Gebäude Unterdruck; kritisch jedoch: untere Verbindung Treppenhaus-Atmosphäre. Sind in den Geschossen Fenster geöffnet (Grenzfall 2), so gilt für die spürbaren Auftriebswirkungen, wie Zug, Druck auf Türen u. ä., und die Abhilfen das gleiche wie für Gebäude ohne Lüftung. Die Luftverteilung wird negativ beeinflusst. Je nach Charakteristik der Gebläse und des Kanalnetzes können sich Verhältnisse näher Grenzfall 2a (starke Abhängigkeit des Gebläsedruckes von der Fördermenge, große Widerstände vor dem Steigschacht) oder näher Grenzfall 2b (umgekehrt) einstellen (Wirklichkeit näher an 2a, besonders für Zuluftsysteme). Mindestens das Zuluftsystem sollte mit Rücksicht auf gleichmäßige Heiz- und Kühlleistungen zweckmäßig durch



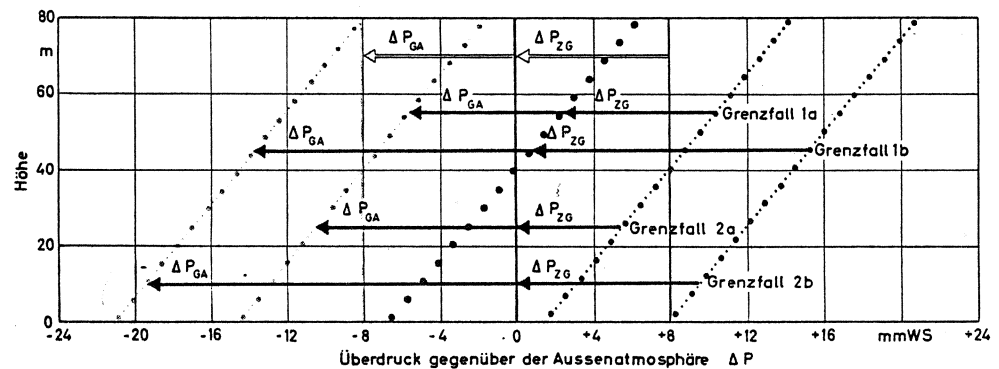
— Grenzfall 1: Zonentüren undurchlässig, Zonen horizontal völlig durchlässig (etwa wirklicher Verlauf)
 --- Annäherung an Grenzfall 2: Durchlässigkeit der Zonentüren groß gegenüber der Summe der horizontalen Durchlässigkeiten (Geschoßtüren, Bürotüren, Fenster)

206 Aufteilung des thermischen Überdruckes durch Höhenzonentüren im Treppenhaus in einem Gebäude ähnlich dem BASF-Hochhaus, jedoch ohne Lüftungsanlage. Winter: $\theta_a = -15^\circ \text{C}$, $\theta_i = +20^\circ \text{C}$

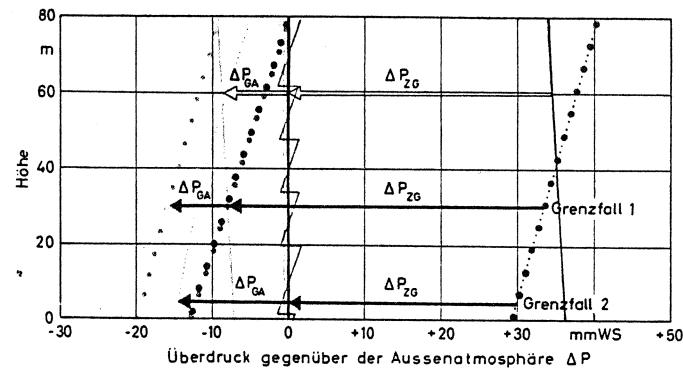
- Geschosse
- Zuluftsteigschacht
- Abluftsteigschacht
- Treppenhaus



208 Zu- und Abluftgebläse unten; gleiche Charakteristik (Niederdruck) für Zu- und Abluftsystem, keine Strömungsverluste in den Schächten



209 Zuluftgebläse unten, Abluftgebläse oben; gleiche Charakteristik (Niederdruck) für Zu- und Abluftsystem, keine Strömungsverluste in den Schächten



210 Zuluftgebläse unten, Abluftgebläse oben; Zuluftsystem Hochdruck, Abluftsystem Niederdruck. Hauptbetriebszustand der Klimaanlage im BASF-Hochhaus. Strömungsverluste in den Schächten qualitativ berücksichtigt

..... Grenzfall 1: Außenhaut völlig undurchlässig

..... Grenzfall 2: Außenhaut völlig durchlässig

- a starke Abhängigkeit des Gebläsedrucks von der Fördermenge, große Widerstände vor dem Steigschacht
- b schwache Abhängigkeit des Gebläsedrucks von der Fördermenge, geringe Widerstände vor dem Steigschacht

ΔP_{MN} Druckdifferenz zwischen den Orten M und N mit Auftriebswirkung

ΔP_{MN} Druckdifferenz zwischen den Orten M und N ohne Auftriebswirkung

Z Zuluftschacht A Abluftschacht G Geschoß T Treppenhaus

208–210 Verteilung des thermischen Überdruckes in einem 80 m hohen Gebäude bei verschiedenen Anordnungen von Lüftungsanlagen
Winter: $\vartheta_a = -15^\circ \text{C}$, $\vartheta_i = +20^\circ \text{C}$

einer schmalen Lüftungsklappe ausgeführt, um die Insassen möglichst zwanglos an die stets geschlossenen Fenster zu gewöhnen. Man hoffte, daß diese Klappen nach einer gewissen Gewöhnungszeit nicht mehr betätigt würden. Eine durchgeführte statistische Erfassung, bei der das Haus mehrmals täglich zu bestimmten Zeiten fotografiert wurde, ergab, daß diese Hoffnung berechtigt war (Abb. 207). Das Ergebnis zeigte z. B., daß vor der großen Hitzewelle im Juli 1957 die Außentemperatur noch einen deutlichen Einfluß auf die Anzahl der geöffneten Klappen hatte. Bei Kühlung des Gebäudes standen z. B. weniger Klappen offen. Nach der Hitzewelle, während der das gewohnheitsmäßige Öffnen unterblieben war, wurden die Klappen bei den gleichen Außentemperaturen wie vorher praktisch nicht mehr benutzt (1–2% der Klappen geöffnet). Natürlich ist diese Frage eng mit der einwandfreien Funktion der Klimaanlage verknüpft.

Literatur

- [1] Flachsbarth, O.: Winddruck auf offene und geschlossene Gebäude. Erg. der Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen, IV. Lieferung, 128–134.

- [2] Raisch, E.: Die Wärme- und Luftdurchlässigkeit von Fenstern verschiedener Konstruktion. G. I. 45 (1922), 9, 99–105.
 [3] Raisch, E.: Die Luftdurchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionsteilen. G. I. 51 (1928), 30, 481–489.
 [4] Raisch, E.: Die Luftdurchlässigkeit von Bauteilen und von Bau- und Wärmeschutzstoffen. Z. VDI 80 (1936), 41, 1257–1258.
 [5] Eberle, Ch.: Versuche über den Wärmeverlust und die Luftdurchlässigkeit von Fenstern. G. I. 51 (1928), 566–570.
 [6] Reiher, H., K. Fraaß u. E. Settele: Über die Frage der Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern. Wärmewirtschaftl. Nachr. 6 (1932/33) 4, 42–52; 5, 55–59.
 [7] Sigwart, K.: Luftdurchlässigkeit von Holz- und Stahlfenstern. G. I. 55 (1932) 43, 515–517.
 [8] Cammerer, J. S.: Der Einfluß der Fensterbauart auf den Luftdurchgang. G. I. 61 (1938) 29, 393–399.
 [9] Dürr, H.: Luft- und Winddurchlässigkeit neuzeitlicher Stahlfensterbauweisen. G. I. 64 (1941) 9, 135–142.
 [10] Krischer, O.: Die Druckverhältnisse in Häusern unter dem Einfluß des Windes und die Lüftungsempfindlichkeit von Räumen. H. L. H. 2 (1951) 2, 37–42.
 [11] Beck, H.: Untersuchungen über die Beeinflussung des Wärmebedarfs von Gebäuden durch Windangriff und die Windzuschläge in der Wärmebedarfsrechnung. Dissertation, Darmstadt (1954).
 [12] DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden.