

# Experimentelle Untersuchungen zum Luftaustausch bei Querlüftung

Dr.-Ing. Anton Maas, Dipl.-Ing. Dietrich Schmidt,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser  
Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik

## 1 Einleitung

Die freie Lüftung über Öffnungen in der Gebäudehülle, wie Fenster und Türen, ist die heute am weitesten verbreitete Form der Lüftung. Der sich einstellende Luftwechsel bei Querlüftung läßt sich jedoch nur abschätzen, da derzeit keine durch Messungen abgesicherten Erkenntnisse der Wirkmechanismen der freien Lüftung existieren. In den nachfolgenden Ausführungen werden die Effekte der Einflußgrößen auf die freie Lüftung eingehend untersucht und in Ansätzen mathematisch beschrieben. Besonderer Wert wird dabei auf die Erfassung der bauseitigen Abhängigkeiten gelegt, wie der Einfluß der jeweiligen Fenstergeometrie und der Fensteröffnung.

## 2 Meßtechnische Untersuchungen

### 2.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Die experimentellen Untersuchungen erfolgen in einem Versuchsgebäude des Fachgebietes Bauphysik der Universität Kassel.

Dieses Gebäude besteht im wesentlichen aus einem Prüfraum mit einem Volumen von 58,5 m<sup>3</sup>, einem unter diesem Raum gelegenen Kellerraum und einem Zwischenboden über dem Prüfraum als thermische Pufferzonen, sowie einem Dachboden. In der südorientierten Prüfraumaußenwand befindet sich ein Fenster mit einem Dreh- und einem Kippflügel, in der Nordfassade ein kombiniertes Dreh-Kippflügel Fenster. Durch die Fenster in der Nord- und Südfassade ist es möglich, eine Querlüftungssituation zu schaffen und die Prüfräume durchströmen zu lassen. Der gesamte für die jeweiligen Untersuchungen nötige Meßaufbau ist innerhalb des Versuchsgebäudes auf dem Dachboden, dem eigentlichen Meß- und Prüfraum und in dem als Meßraum eingerichteten Kellerraum angeordnet (Bild 1).

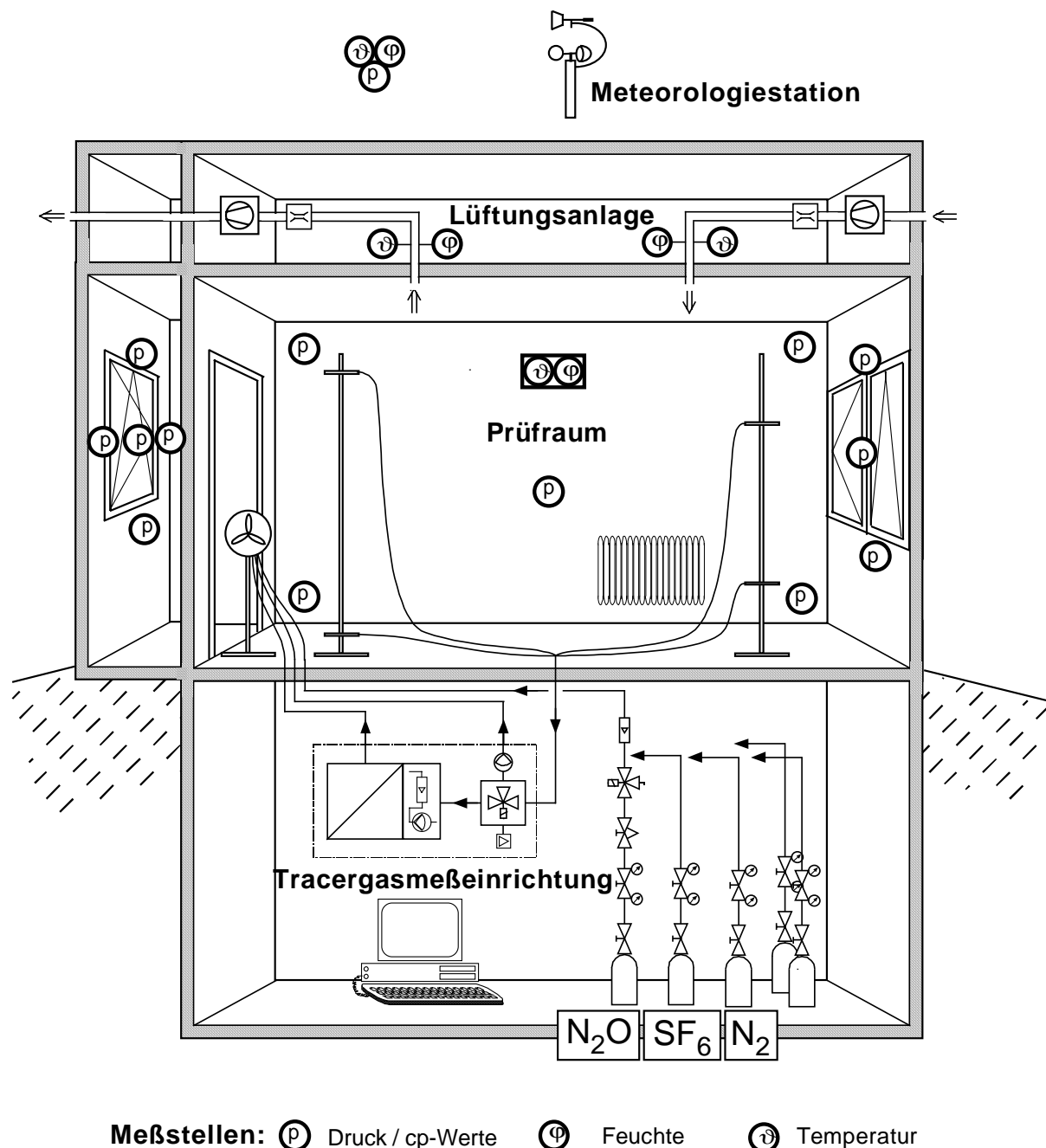


Bild 1: Schematische Darstellung der Experimentiereinrichtung

Eine direkt am Versuchsgebäude installierte Meteorologiestation liefert die zu den jeweiligen Untersuchungen nötigen meteorologischen Größen.

Der Luftwechsel in der Prüfzone, beziehungsweise der Zu- und Abluftvolumenstrom wird meßtechnisch über das indirekt arbeitende Tracergasmeßverfahren ermittelt. Der Versuchsaufbau ermöglicht Messungen mit der Konzentrationsabfall- und Konstant-Konzentrations-Methode. Es stehen zwei komplette Tracergasmeßeinrichtungen mit den Meßgasen N<sub>2</sub>O und SF<sub>6</sub> zur Verfügung. Zur Kalibration der Tracergasmeßeinrichtung wird eine Lüftungsanlage als Referenz verwendet, die getrennt voneinander einzustellende Zu- und Abluftvolumenströme im

Bereich 50 bis 1200 m<sup>3</sup>/h (entspricht Luftwechseln von 0,85 bis 20 1/h) durch den Prüfraum fördert.

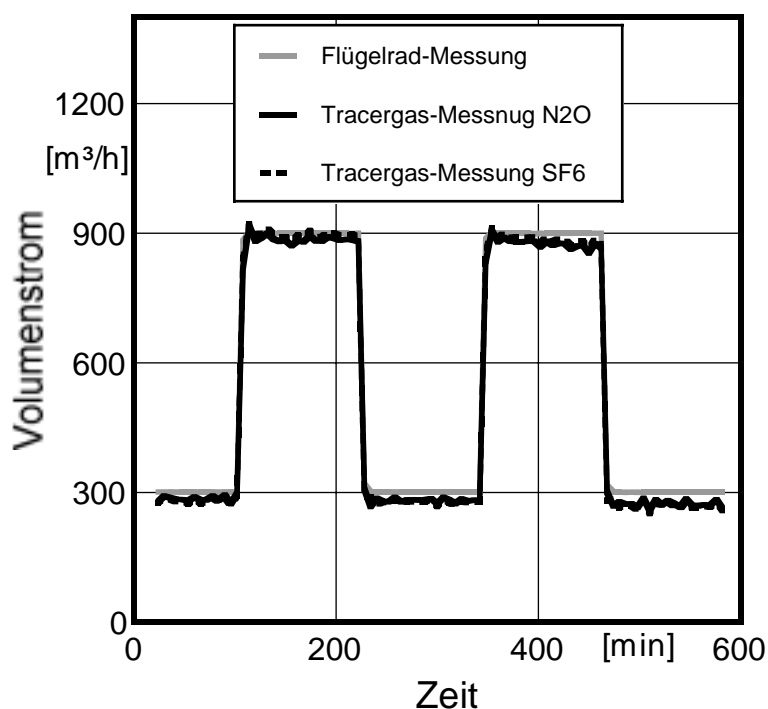


Bild 2: Gegenüberstellung eines über Flügelrad- und Tracergasmessung mit zwei verschiedenen Gasen bestimmten Zuluftvolumenstromes.

Eingehende regelungstechnische Untersuchungen und Referenzmessungen [1] (Bild 2) zeigen, daß die Tracergasmethode auch für die bei Querlüftung auftretenden hohen Luftwechsel ein zuverlässiges Meßverfahren ist.

## 2.2 Versuchsprogramm

Mit Hilfe der beschriebenen Versuchseinrichtungen wird der Luftwechsel im Prüfraum unter natürlichen meteorologischen Bedingungen bestimmt. Für diese Messungen kommt die Konstant-Konzentration-Meßmethode zum Einsatz, die eine kontinuierliche Erfassung des Luftaustausches ermöglicht. Damit wird gewährleistet, daß eine große Anzahl verwertbarer Meßdaten für die unterschiedlichen, relativ schnell wechselnden meteorologischen Randbedingungen gewonnen werden. Im Rahmen der durchgeführten Messungen sind ca. 1300 h verwendbare Meßdaten bei den verschiedenen Meßvarianten gesammelt worden.

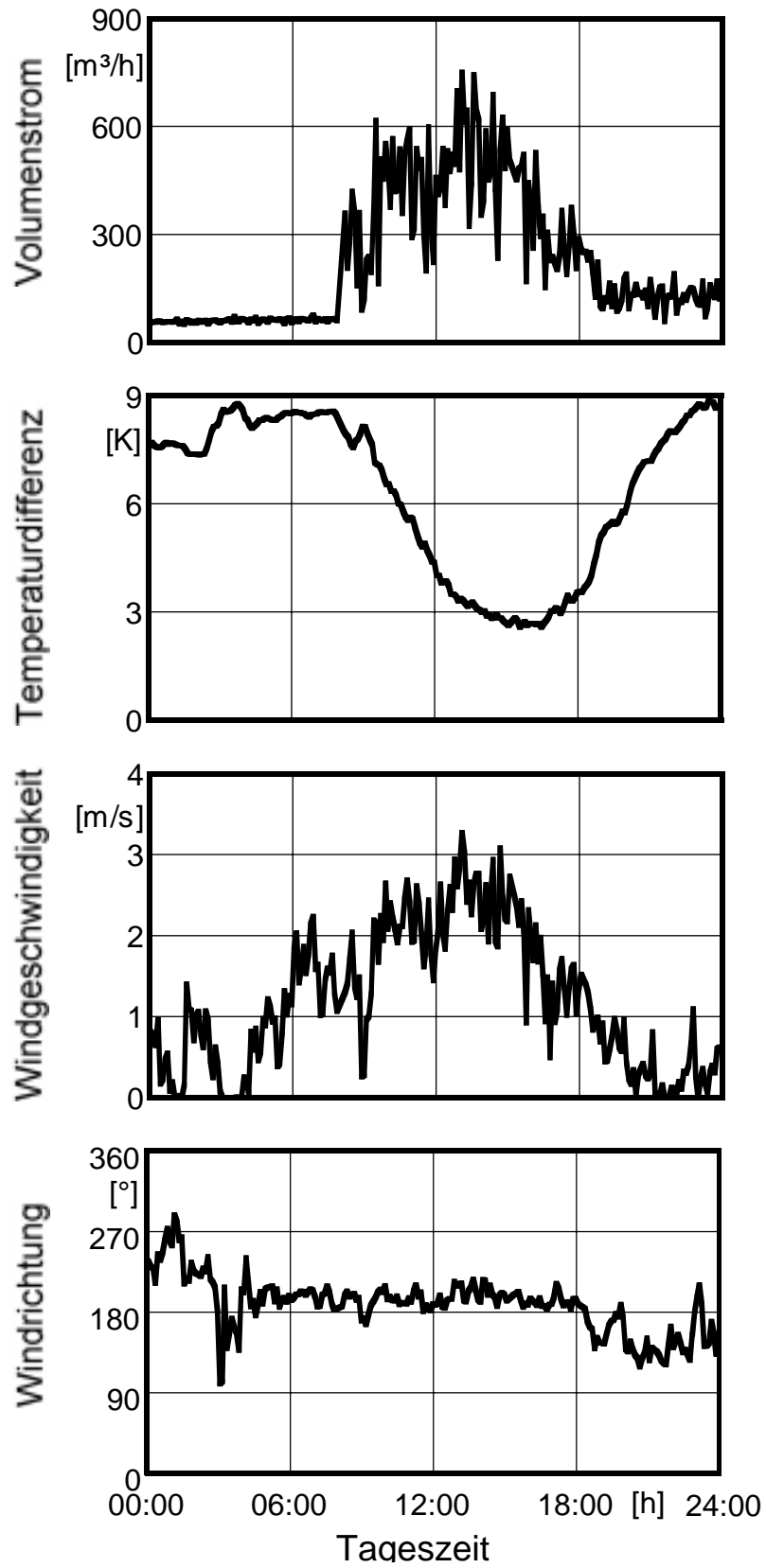


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der wesentlichen Einflußgrößen auf den Luftaustausch am 18.02.1998.

Bild 3 gibt den zeitlichen Verlauf der wichtigsten äußeren Einflußgrößen auf den Luftwechsel im Raum an einem Beispieltag wieder. Von 0:00 Uhr bis ca. 8:00 Uhr ist nur ein Kippfenster geöffnet, ab 8:00 Uhr sind beide Fenster in Kippstellung, es ist die Querlüftungssituation eingestellt. Zu beachten ist das starke Ansteigen des Luftwechsels infolge Querlüftung und die sehr viel stärkere Dynamik in der Aufzeichnung. Der Luftwechsel bei Querlüftung wird wesentlich durch den Windeinfluß bestimmt. Die Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft, die den thermisch induzierten Luftaustausch hervorruft, spielt für den Gesamtluftaustausch bei Querlüftung eine untergeordnete Rolle.

Die Messungen erfolgen bei unterschiedlichen Öffnungsweiten der Kippfenster. Eine Übersicht der zugrunde gelegten Varianten der Meßreihen gibt Tabelle 1. Die Öffnungsweiten der Variante Standard ergeben sich aus der Verwendung von handelsüblichen Kippbeschlägen.

Tabelle 1: Variation der Öffnungsweiten der Kippfenster bei den Messungen

Variante	Öffnungsweite a am Nordfenster	Öffnungsweite a am Südfenster
Standard	15,5 cm	13,5 cm
einseitig vermindert	5 cm	13,5 cm
beidseitig vermindert	5 cm	5 cm

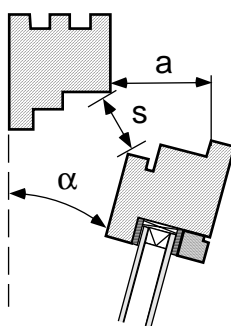


Bild 4: Definitionen der Öffnungsweiten und -winkel am Kippfensterflügel

Tabelle 2: Maße der Fenster und Beschreibung der Öffnungssituation

	Nordfenster		Südfenster	
Fensterbreite B	0,92 m		0,82 m	
Fensterhöhe H	1,21 m		1,12 m	
Öffnungsweite a	15,5 cm	5 cm	13,5 cm	5 cm
Lichte Öffnungsweite s	10,4 cm	2,5 cm	8,9 cm	2,6 cm
Öffnungswinkel $\alpha$	7,30°	2,37°	6,87°	2,56°

### 3 Meßergebnisse

Für die Auswertung der Meßergebnisse werden zunächst die aus der Literatur bekannten mathematischen Modellansätze von Daler et al [2] und Maas [4] zur Beschreibung des Luftwechsels durch Fensteröffnungen herangezogen und die jeweiligen Meßergebnisse mit eigenen Anpassungen vergleichend gegenübergestellt.

#### 3.1 Temperatureinfluß

Allgemeine Betrachtungen zeigen, daß sich der einstellende Volumenstrom durch eine hinreichend große Einzelöffnung in der Gebäudehülle durch eine Proportionalbeziehung zur Wurzel der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur bei vernachlässigbar kleiner Windgeschwindigkeit bestimmen läßt [7]. Als Ausgleichskurve wird daher ebenfalls eine Wurzelfunktion gewählt.

Die Arbeiten von Maas [4] und Daler [2] liefern Ergebnisse für die Strömung durch ein Fenster, die einseitige Fensterlüftung. Für den Vergleich werden diese Werte auf beide Fenster des Versuchsaufbaus bezogen und der sich ergebene Volumenstrom durch beide Fenster beschrieben.

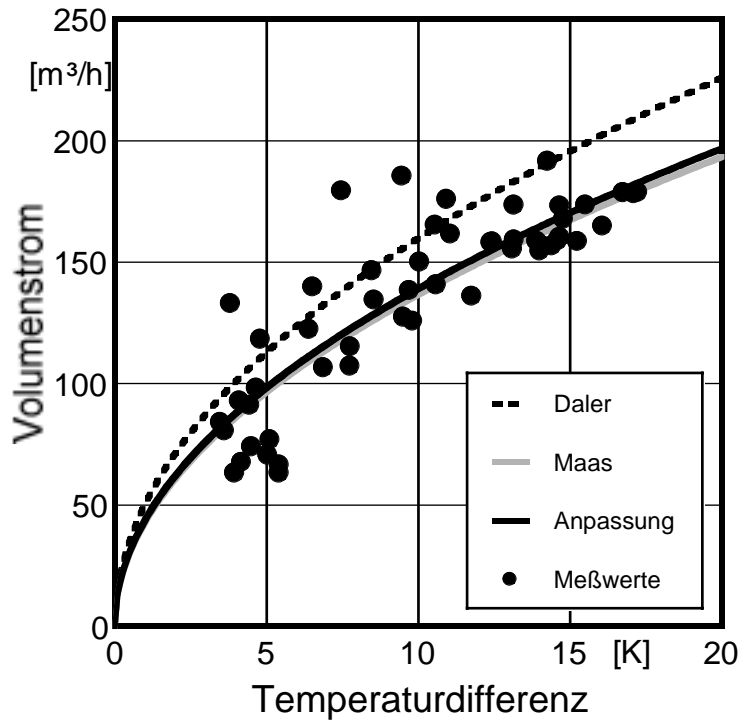


Bild 5: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz für die Meßvariante Standard. 1 h Mittelwerte, Windgeschwindigkeit  $u < 0,3$  m/s.

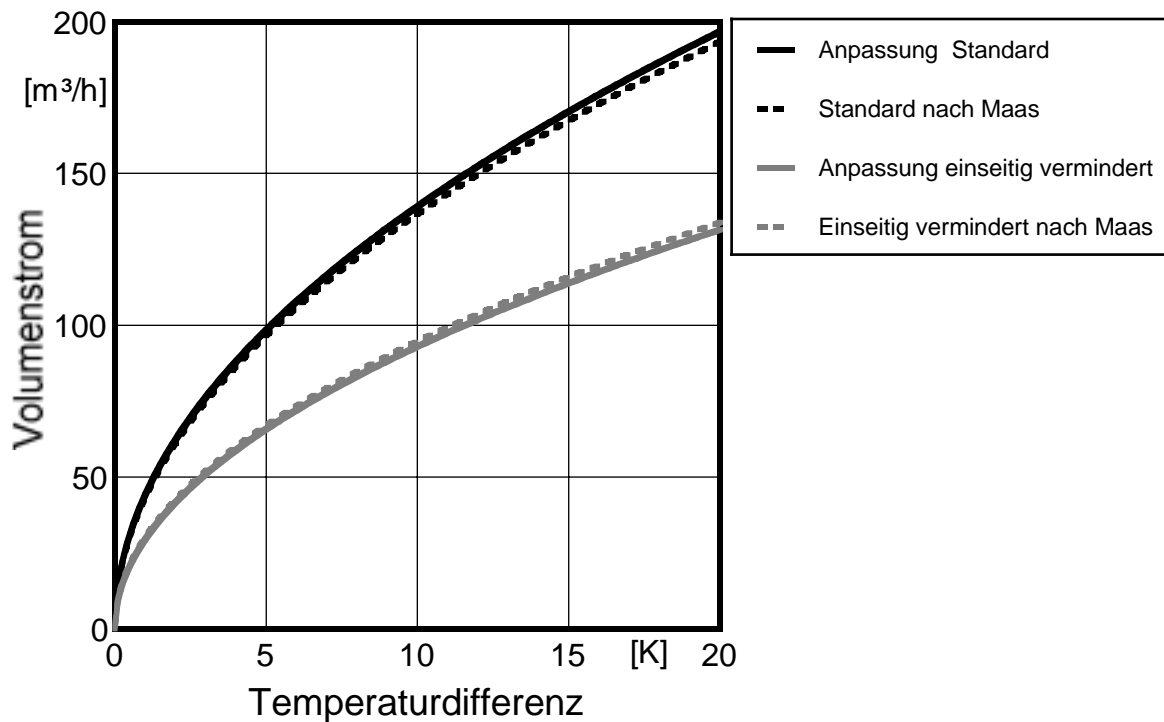


Bild 6: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz für alle Meßvarianten. 1 h Mittelwerte, Windgeschwindigkeit  $u < 0,3$  m/s.

Bild 5 zeigt die aufgenommenen Meßwerte der Meßvariante Standard, beide Fenster in normaler Kippstellung, als 1h Mittelwerte für vernachlässigbar kleine Windgeschwindigkeiten von  $u < 0,3$  m/s. Für den thermisch induzierten Luftaustausch wird eine Anpassung durch eine Wurzelfunktion gewählt und den Ergebnissen von Maas [4] und Daler [2] gegenübergestellt. Die Werte von Daler weichen um +14,8 %

von der Anpassung ab, die von Maas um -1,7 %. Dies erklärt sich unter anderem dadurch, daß die Untersuchungen von Maas am selben Versuchgebäude durchgeführt wurden.

Eine Übersicht über die Anpassungen der Messungen und der Rechnungen nach Maas für die Varianten Standard und „einseitig vermindert“ ist mit Bild 6 gegeben. Bei der Fensteröffnungssituation „beidseitig vermindert“ sind für eine Anpassung nicht ausreichend Meßdaten vorhanden.

### 3.2 Windeinfluß

Für die Betrachtung des windinduzierten Luftwechsels, des Luftaustausches auf Grund von Druckdifferenzen auf den Fassadenflächen, ist es notwendig sowohl die Windgeschwindigkeit, als auch die jeweilige Windrichtung zu betrachten. Um die örtlichen Windverhältnisse deutlich zu machen, ist in Bild 7 die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung in einem Polardiagramm dargestellt. Für die Untersuchungen werden 90° Sektoren um die Haupthimmelsrichtungen, zusätzlich zu der Hauptwindrichtung Süd-West, betrachtet.

Nord	315° - 45°
Ost	45° - 135°
Süd	135° - 225°
West	225° - 315°
Süd-West (hinterlegt)	180° - 270°

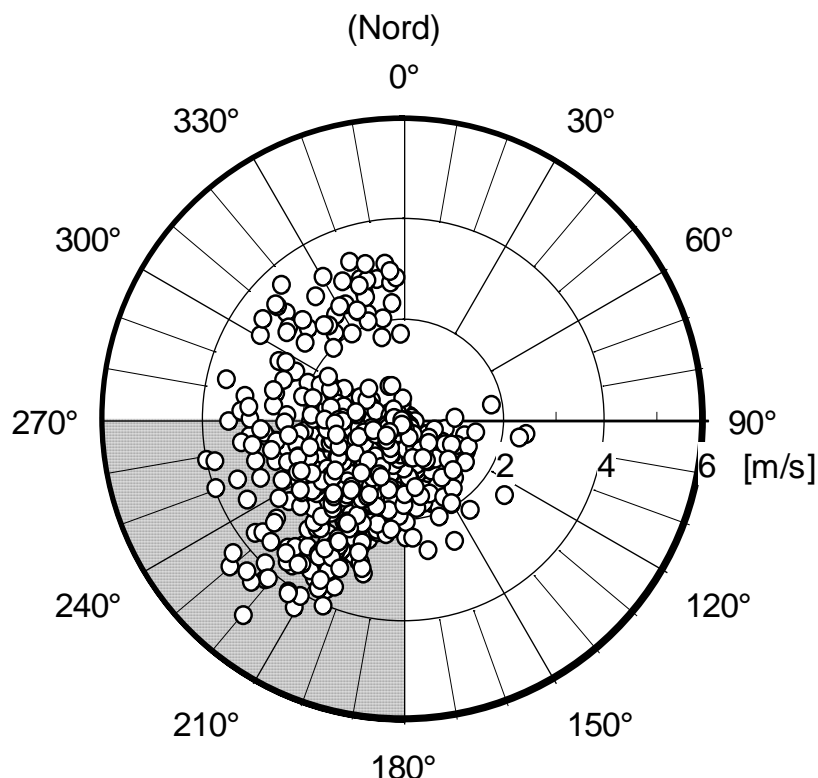


Bild 7: Darstellung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung. Meßvariante Standard, 1h Mittelwerte.



Da der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf den Luftwechsel isoliert vom Temperatureinfluß untersucht werden soll, sind die Daten für eine Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft von 2 bis 4 K beschränkt. Für diesen Fall liegen ausreichend Meßdaten vor.

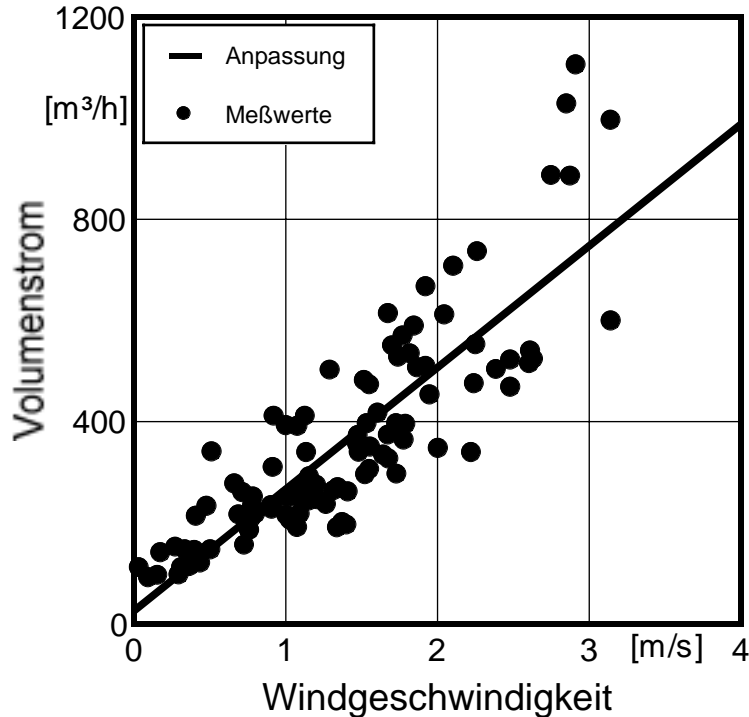


Bild 8: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Südanströmung. Meßvariante Standard, Temperaturdifferenz  $2K < \Delta\vartheta < 4K$ , 1h Mittelwerte.

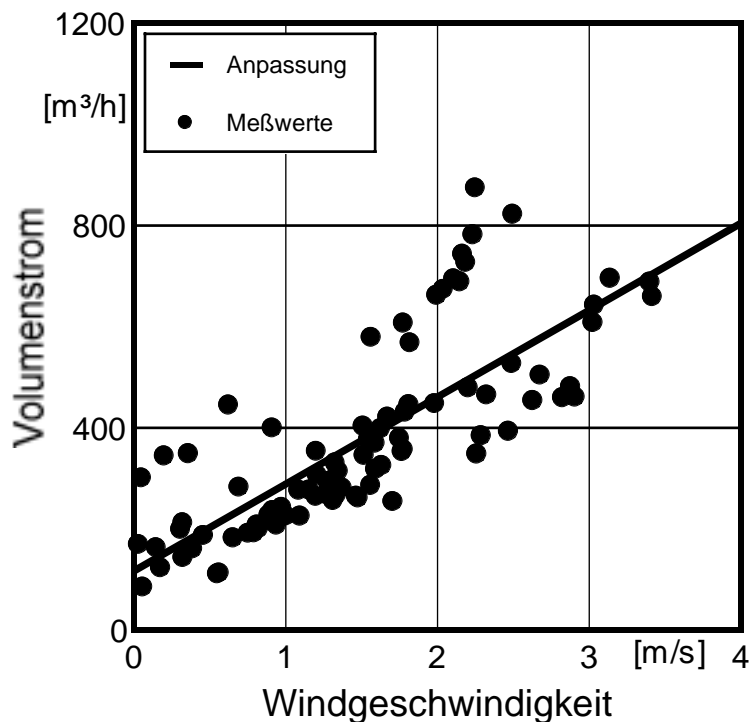


Bild 9: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Westanströmung. Meßvariante Standard, Temperaturdifferenz  $2K < \Delta\vartheta < 4K$ , 1h Mittelwerte.

Für die Hauptwindrichtung Süd-West zeigt sich die annähernd gleiche Charakteristik, wie für Süd. Die Windrichtung hat untergeordnete Bedeutung für die Größe des Luftaustausches.

### 3.3 Gleichzeitiger Temperatur- und Windeinfluß

Die Abhängigkeit des resultierenden Zuluftvolumenstromes bei gleichzeitigem Einfluß von Thermik und Wind wird in Bild 10 vorgestellt. Sowohl Daler [2] und Warren [8], als auch Maas [4] bestätigen, daß sich die Effekte nicht einfach additiv überlagern. Für die Situation der Querlüftung spielt jedoch der Effekt der Volumenstromerhöhung durch eine größere Temperaturdifferenz, selbst bei sehr extremen Temperaturdifferenzen, im Vergleich zur Wirkung der Windgeschwindigkeit eine völlig untergeordnete Rolle.

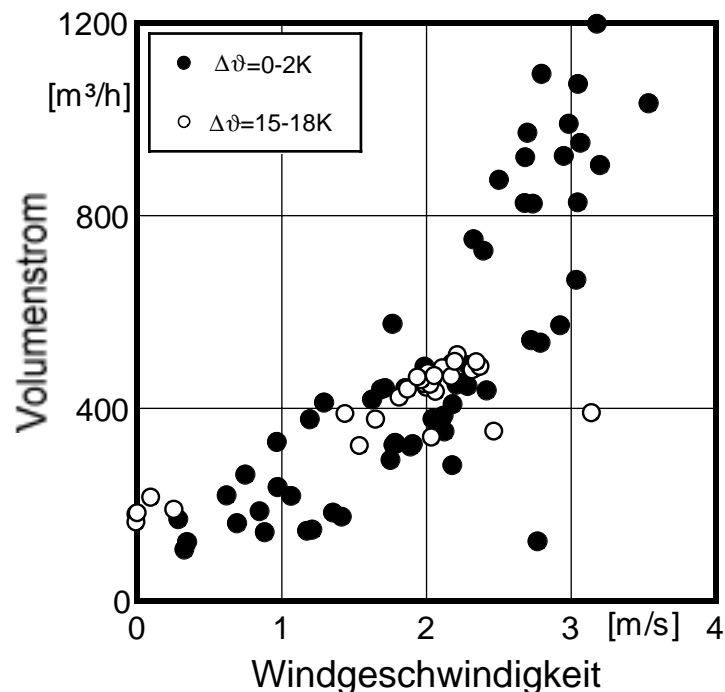


Bild 10: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Südanströmung. Meßvariante Standard, 1h Mittelwerte.

## 4 Theoretische Untersuchungen

Der folgende Ansatz, der für den Fall der einseitigen Fensterlüftung aufgestellt wurde, wird untersucht und auf die Querlüftungssituation erweitert und weiterentwickelt.

### 4.1 Modellansatz

In [5] wird ein Modell zur Bestimmung des Zuluftvolumenstromes durch einseitige Fensterlüftung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, der

Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft, der jeweiligen Fensterstellung und der Einbausituation des Fensters präsentiert. Dieser Modellansatz wurde mit den im Rahmen einer Dissertation durchgeführten Messungen modifiziert und überprüft [4].

Ausgehend von der Form:

$$\dot{V}_{Zu} = \zeta \cdot A \cdot u$$

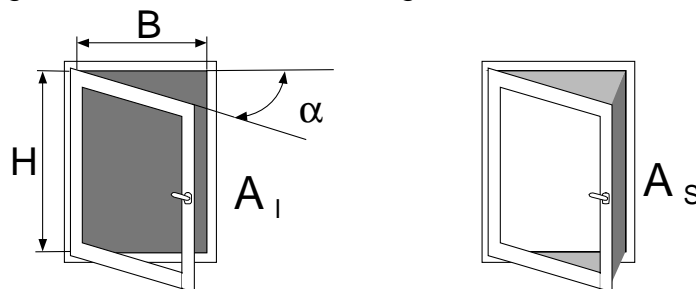
mit einer Strömungswiderstandszahl  $\zeta$ , einer durchströmten Fläche  $A$  und einer Strömungsgeschwindigkeit  $u$  ergibt sich:

$$\dot{V}_{Zu} = \Theta \cdot \frac{1}{2} \cdot A_I \cdot \sqrt{C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H \cdot \Delta\vartheta + C_3}$$

Mit der Definition des Durchflußverhältnisses:

$$\Theta = \frac{A_{eq}(\alpha)}{A_{eq}(\alpha = 90^\circ)} \quad A_{eq}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_I^2} + \frac{1}{A_S^2}}}$$

Gemäß der Fenstergeometrie ist für ein Drehflügel Fenster:



$$A_I = B \cdot H$$

$$A_S = 2 \cdot B \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \left[ B \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + H \right]$$

Anders als bei der einseitigen Fensterlüftung tritt für die Querlüftung zu dem ausgetauschten Volumenstrom durch Wind- und Temperatureinfluß ein Volumenstromanteil für die Durchströmung des Gebäudes hinzu [2]:

$$\dot{V}_{Quer} = \dot{V}_A + \dot{V}_D$$

Für den Austausch wird der obige Ansatz erweitert und die Parameter durch einen Ansatz der additiven Überlagerung der Volumenströme durch zwei gegenüberliegende Fenster gleicher Höhe beschrieben:

$$\dot{V}_A = \left( \Theta_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{I1} + \Theta_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{I2} \right) \cdot \sqrt{C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H_{1,2} \cdot \Delta\vartheta + C_3}$$

Für den Durchströmungsanteil wird ein Ansatz für in Strömungsrichtung hintereinanderliegende Öffnungen gewählt [2]:

$$\dot{V}_D = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{1}{\Theta_1 \cdot A_{I1}} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Theta_2 \cdot A_{I2}} \right)^2}} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{ges}}}{\rho}}$$

Unter der Annahme, daß sich die gesamte Druckdifferenz über dem Gebäude durch Wind entsprechend der ursprünglichen Modellgleichung verursacht wird, ist:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{ges}}}{\rho}} = \sqrt{C_4 \cdot u^2}$$

Der zu validierende Modellgleichungsansatz für Querlüftung über je ein Fenster in gegenüberliegenden Fassaden lautet somit:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Zu} = & \left( \Theta_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{I1} + \Theta_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{I2} \right) \cdot \sqrt{C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H_{1,2} \cdot \Delta\vartheta + C_3} \\ & + \frac{\sqrt{C_4 \cdot u^2}}{\sqrt{\left( \frac{1}{\Theta_1 \cdot A_{I1}} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Theta_2 \cdot A_{I2}} \right)^2}} \end{aligned}$$

Diese Gleichung ist besonders auf ihre Eignung zur Beschreibung der Querlüftungssituation hin zu untersuchen. Die Koeffizienten der Modellgleichung werden durch eine vierdimensionale Chi-Quadrat-Anpassung nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren, wie es unter anderem von Press [6] beschrieben ist, ermittelt.

## 4.2 Modellanpassung

Abweichend von dem in 4.1 vorgestellten Modellansatz erfolgt die Modellanpassung mit einem experimentell bestimmten Durchflußverhältnis  $\Theta$  durch Tracergasmessungen nach der Konzentrations-Abfall-Methode nach Maas [4] mit:

$$\Theta = \frac{\dot{V}_{Zu}(\alpha)}{\dot{V}_{Zu}(\alpha = 90^\circ)}$$

Damit ist eine bessere Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und Messung gegeben. Ein Vergleich zwischen den gemessenen Durchflußverhältnissen und den nach obigen Gleichungen berechneten gibt Bild 11 wieder.

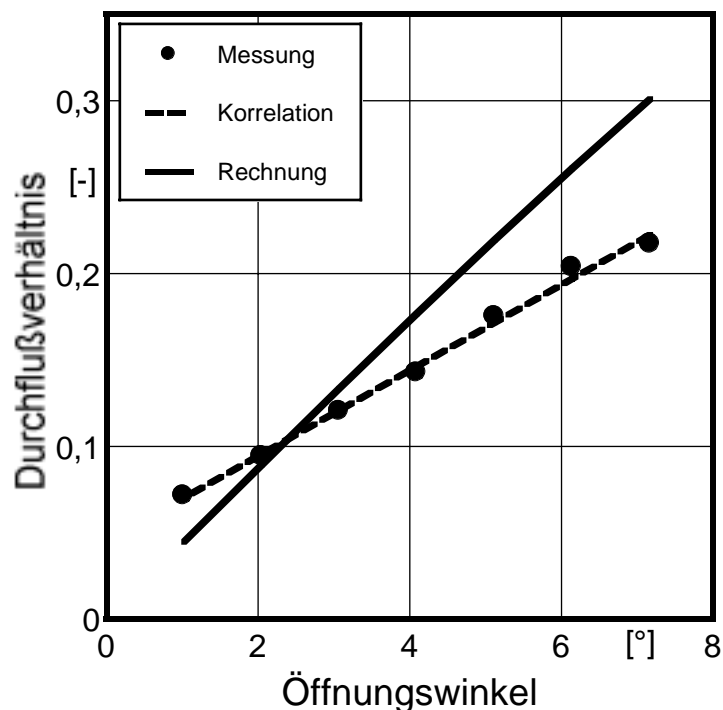


Bild 11: Durchflußverhältnis  $\Theta$  eines Kipflügel Fensters in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel  $\alpha$  [4].

Für die Anpassung der Modellgleichung werden jeweils für die einzelnen Meßvarianten (Standard, einseitig vermindert und beidseitig vermindert) insgesamt 1248 1h-Mittelwerte der gemessenen Zuluftvolumenströme, Windgeschwindigkeiten und Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen herangezogen. Da das Ergebnis der Optimierung stark von den Startwerten abhängig ist, wird hier für jede Meßvariante ein Koeffizientensatz vorgestellt:

Tabelle 3: Berechnete Koeffizienten der Modellgleichung für die einzelnen Meßvarianten

Variante	$C_1$ ./.	$C_2$ m/s <sup>2</sup> K	$C_3$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$C_4$ ./.
Standard	0,01965	$1,896 \cdot 10^{-3}$	0,01706	0,01946
einseitig vermindert	$2,612 \cdot 10^{-5}$	$1,331 \cdot 10^{-4}$	$8,768 \cdot 10^{-4}$	0,01061
beidseitig vermindert	$5,558 \cdot 10^{-3}$	$1,737 \cdot 10^{-4}$	$2,949 \cdot 10^{-3}$	$3,734 \cdot 10^{-3}$

Mit den angegebenen Koeffizienten des Rechenmodells werden die Zuluftvolumenströme für die einzelnen Öffnungssituationen berechnet und in Bild 12 über die gemessenen Werte aufgetragen.

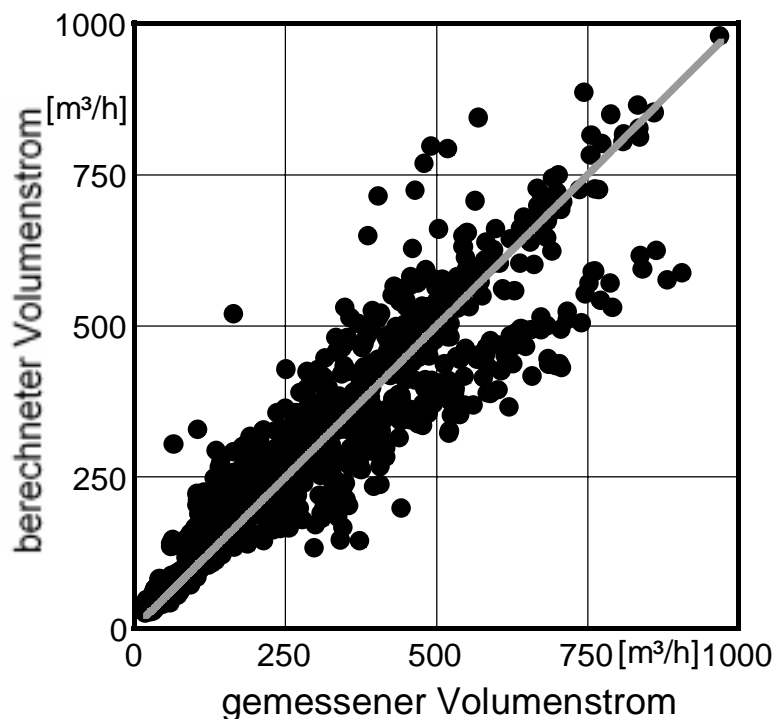


Bild 12: Vergleich der gemessenen und berechneten Zuluftvolumenströme für alle Kippweiten.  
1h Mittelwerte

Die mittlere Abweichung beträgt  $42,98 \text{ m}^3/\text{h}$  bei maximalen relativen Abweichungen von  $-62,1 \%$ , beziehungsweise  $+347,7 \%$ . Diese doch recht großen relativen Abweichungen kommen durch die Modellanpassung für kleinere Volumenströme bei der Variante Standard zustande. Die Verwendung kleinerer Zeitschritte für die Mittelwertbildung der Meßdaten läßt keine wesentliche Verbesserung der Modellanpassung erwarten [4].

Die berechneten Koeffizienten der Modellanpassung bestätigen, daß der Effekt des thermikinduzierten Luftaustausches im Gegensatz zu der windinduzierten Durchströmung des Gebäudes zu vernachlässigen ist. So ist  $C_2$ , der Faktor für die Temperaturanpassung, mindestens eine Zehnerpotenz kleiner als der Durchströmungsfaktor  $C_4$ . Durch die teilweise großen Abweichungen zwischen Anpassung und Messung zeigt sich, daß eine einfache Addition der wind- und temperaturinduzierten Volumenströme, so wie in diesem Bericht präsentiert, nicht uneingeschränkt gültig ist. Teilweise heben sich die Effekte auf, was von anderen Autoren vermutet wird [2], [4], [8]. Im Rahmen dieser Untersuchungen ist es jedoch nicht möglich diese Problematik zu klären.

## 5 Zusammenfassung

Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen können die folgenden Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Aus den Ergebnissen der Messungen läßt sich für den durch die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft verursachten Luftaustausch

feststellen, daß die Modelle für einseitige Fensterlüftung auch bei Querlüftung ihre Gültigkeit haben.

- Weiterhin läßt sich aus den Messungen für den windinduzierten Luftwechsel folgern, daß die Abhängigkeit von der Anströmrichtung, ähnlich wie bei der einseitigen Fensterlüftung, gering ist.
- Wirken Wind und Temperatur gleichzeitig, ist der Effekt, den die Thermik am Luftaustausch hat, anders als bei der einseitigen Fensterlüftung, zu vernachlässigen. Schon bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten überwiegt der Effekt der Windanströmung, speziell der Anteil der Durchströmung des Gebäudes.
- Mit den aufgenommenen Meßdaten wird ein Rechenmodell zur Beschreibung des Luftwechsels bei Querlüftung angepaßt. In diesem Modell wird der Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der örtlichen Windgeschwindigkeit, der Temperaturdifferenz Raum- und Außenluft und Turbulenzanteilen für den Luftaustausch und die Durchströmung beschrieben. Die Stellung des Fensters wird über die lichte Fläche der Fensteröffnung und ein experimentell bestimmtes Durchflußverhältnis beschrieben. Eine Gleichung zur Bestimmung des Durchflußverhältnisses aus den geometrischen Größen wird gleichfalls vorgestellt. Der Vergleich Rechnung/Messung weist eine mittlere Abweichung von 42,98 m<sup>3</sup>/h auf, bei maximalen relativen Abweichungen von -62,1 %, beziehungsweise +347,7 %. Diese recht großen relativen Abweichungen kommen durch die Modellanpassung für kleinere Volumenströme bei den Messungen mit beiden Kippfenstern in normaler Kippstellung zustande.

## 6 Nomenklatur

Größe	Einheit	Bedeutung
A	m <sup>2</sup>	Fläche
a	m	Fensteröffnungsweite
B	m	Breite
C <sub>1</sub>	-	Windgeschwindigkeitskoeffizient 1 des Modellansatzes
C <sub>2</sub>	m/s <sup>2</sup> K	Temperaturkoeffizient 2 des Modellansatzes
C <sub>3</sub>	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Turbulenzkoeffizient 3 des Modellansatzes
C <sub>4</sub>	-	Windgeschwindigkeitskoeffizient 4 des Modellansatzes
H	m	Höhe
p	Pa	Druck
s	m	Lichte Fensteröffnungsweite
u	m/s	Windgeschwindigkeit
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom

---

$\alpha$	°	Fensteröffnungswinkel
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz
$\zeta$	-	Strömungswiderstandszahl
$\Theta$	-	Durchflußverhältnis
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte

## Literaturverzeichnis

- [1] *Maas, A.*: „Tracergasmeßtechniken zur Ermittlung des Luftwechsels“. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997), H. 5, S. 256-267.
- [2] *Daler, R.; Hirsch, E.; Haberda, F.; Knöbel, U.; Krüger, W.*: „Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau“, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 84-028, 1984.
- [3] *Feustel, H. E.; Raynor-Hoosen, A.* (Hrsg.): „Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS“, Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note AIVC 29, 1990.
- [4] *Maas, A.*: „Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung“. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Architektur, 1995.
- [5] *Phaff, J. C.; de Gids, W. F.; Ton, J. A.; van der Ree, D. V.; Schijndel, L. L. M.*: „Ventilatie von Gebouwen. Onderzoek naar de Gevolgen van Het Openen van een Raam op Het Binnenklimaat von een Kamer.“, Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek, Rapport C 448, Delft, Niederlande, 1980.
- [6] *Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P.*: „Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing“. Cambridge University Press, 1992.
- [7] *Van der Maas, J.* (Hrsg.): „Air flow Through Large Openings in Buildings“, Annex 20: Air Flow Patterns within Buildings. Subtask 2: Air Flows between Zones. International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 1992.
- [8] *Warren, P. R.*: „Ventilation Through Openings on One Wall Only“. International Conference on Heat and Mass Transfer in Buildings, 1977.