

# **Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur  
des Fachbereichs Architektur  
der Universität Gesamthochschule Kassel

von

Anton Maas

Kassel 1995

Dissertation eingereicht am: 27. Juni 1995

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Oktober 1995

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bauphysik der Universität Gesamthochschule Kassel.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser für die Anregung zu dieser Arbeit und die anschließende Förderung und Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Bauphysik, die mit Rat und Tat zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlichst gedankt. Besonders danke ich Herrn Dipl.-Phys.-Ing. Frank Keldenich für die programmiertechnische Unterstützung und weiterhin Frau Dipl.-Ing. Kirsten Höttges für die Text- und Grafikgestaltung der Arbeit.

# Gliederung

	Seite
<b>Nomenklatur</b> .....	1
<b>1. Einleitung</b> .....	3
<b>2. Einflußgrößen auf den natürlichen Luftwechsel</b> .....	5
<b>3. Tracergasmeßtechniken zur Ermittlung des Luftwechsels</b> .....	8
3.1 Meßprinzip und mathematisch-physikalische Modellbildung .....	8
3.2 Voraussetzungen bei der Durchführung von Tracergas-Messungen ....	11
3.3 Beschreibung einzelner Tracergas-Methoden .....	13
3.3.1 Konzentrationsabfall-Methode .....	13
3.3.2 Konstant-Emissions-Methode .....	14
3.3.3 Tracergas-Puls-Methode .....	15
3.3.4 Konstant-Konzentrations-Methode .....	16
3.4 Nachteile und Grenzen der Tracergas-Meßverfahren .....	16
3.5 Auswerteverfahren .....	19
3.5.1 Konstant-Konzentrations-Methode .....	19
3.5.2 Konzentrationsabfall-Methode .....	20
<b>4. Versuchsaufbau</b> .....	21
4.1 Versuchsgebäude und Meßraum .....	21
4.2 Luftwechselmeßsystem .....	22
4.2.1 Beschreibung des Meßaufbaus .....	22
4.2.2 Regelungssystem .....	28
4.3 Meteorologiestation .....	32

---

<b>5. Versuchsdurchführung</b> .....	34
5.1 Meteorologische Randbedingungen .....	34
5.2 Auswahl der Meßvariationen .....	36
5.3 Referenzmessungen .....	38
5.4 Luftwechsel bei geschlossenem Fenster .....	41
<b>6. Meßergebnisse</b> .....	43
6.1 Temperatureinfluß .....	45
6.2 Windeinfluß .....	49
6.3 Einfluß der Einbausituation des Fensters .....	52
6.4 Fehlerbetrachtung .....	53
6.4.1 Konstant-Konzentrations-Methode .....	53
6.4.2 Konzentrationsabfall-Methode .....	55
<b>7. Rechnerische Methoden zur Ermittlung des Luftwechsels</b> .....	59
7.1 Gewählter Modellansatz .....	59
7.2 Definition des Durchflußverhältnisses .....	60
7.3 Modellanpassung .....	64
7.4 Anwendung des Rechenmodells .....	68
7.4 Problematik bei großen Öffnungsweiten .....	71
<b>8. Luftwechsel und Lüftungswärmeverluste in der Heizzeit</b> .....	73
8.1 Festlegung der Randbedingungen .....	73
8.2 Luftwechsel .....	74
8.3 Lüftungswärmeverluste .....	81
<b>9. Zusammenfassung</b> .....	88
<b>10. Literaturverzeichnis</b> .....	92
<b>Anhang</b> .....	100

## Nomenklatur

Größe	Einheit	Bedeutung
A	m <sup>2</sup>	Fläche
B	m	lichte Breite der Fensteröffnung
C	ppm	Konzentration des Tracergases
c <sub>p</sub>	kJ/(kg K)	spez. Wärmekapazität
C <sub>1</sub>	-	Geschwindigkeitskoeffizient des Modellansatzes
C <sub>2</sub>	m/(s <sup>2</sup> K)	Temperaturkoeffizient des Modellansatzes
C <sub>3</sub>	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Turbulenzkoeffizient des Modellansatzes
F	m <sup>3</sup> /h	Tracergasvolumenstrom
H	m	lichte Höhe der Fensteröffnung
K <sub>p</sub>	ml / (ppm min)	Proportionalitätsbeiwert des Reglers
K <sub>s</sub>	ppm min / ml	Verstärkung der Regelstrecke
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
n	h <sup>-1</sup>	Luftwechsel
p	Pa	Druck
Q <sub>L</sub>	kW	Lüftungswärmeverlust
Q <sub>L,a</sub>	kWh/a	jährlicher Lüftungswärmeverlust
R	J/(kg K)	Gaskonstante
s	cm	Fensteröffnungsweite
t	h	Zeit
t <sub>70</sub>	s	charakteristische Zeit der Sprungantwort
T, $\vartheta$	K, °C	Lufttemperatur
T	s	Zeitkonstante der Regelstrecke
u	m/s	Windgeschwindigkeit
V	m <sup>3</sup>	effektives Raumvolumen
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom
α	°, -	Fensteröffnungswinkel, Durchflußzahl
ΔC	ppm	Differenz der Tracergaskonzentration
Δp	Pa	Druckdifferenz

$\Delta t$	h	Zeitintervall
$\Delta \vartheta$	K	Temperaturdifferenz
$\Theta$	-	Durchflußverhältnis
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	m <sup>3</sup> /h	Standardabweichung
$\tau_n$	h	nominale Zeitkonstante

### **Indizes    Bedeutung**

a	außen
ab	Abluft
eff	effektiv
eq	äquivalent
i	innen
ist	Istwert
l	lichte Fensteröffnung
L	Luft
F	Tracergas
m	Mittelwert, Massebezug
max	Maximalwert
met	meteorologisch
R	Wert aus Rechnung
s	seitliche Öffnungsflächen
soll	Sollwert
t	Turbulenzeffekt
T	Tracergasmessung
v	vektoriell
w	Wind
zu	Zuluft
$\vartheta$	Temperatur
$\infty$	Grenzwert

## 1. Einleitung

Die Form der Lüftung hat einen entscheidenden Einfluß sowohl auf das thermische Verhalten von Gebäuden als auch auf die Raumluftqualität. Bei der Mehrzahl der heute errichteten Gebäude erfolgt die Lüftung über Fenster und Türen oder andere Öffnungen in der Gebäudehülle. Man spricht von freier oder natürlicher Lüftung, wenn als Antriebskräfte ausschließlich Temperatur- und Windeinwirkung vorherrschen.

Ausgehend von Mindestluftwechseln, die aus hygienischen und bauphysikalischen Anforderungen resultieren, werden heute Außenluftstraten empfohlen, welche die Abfuhr von Schadstoffen in Gebäuden gewährleisten und Bauschäden infolge zu geringer Lüftung ausschließen sollen. Diese Außenluftstraten sollen zur Dimensionierung von Außenluftdurchlässen dienen, über die der natürliche Luftwechsel infolge von Druckunterschieden zwischen dem Inneren und dem Äußeren eines Gebäudes stattfindet.

Den Anforderungen an einen Mindestluftwechsel steht die Begrenzung des Luftaustausches hinsichtlich energetischer Aspekte gegenüber. Bei Gebäuden, die nach dem heutigen Wärmeschutzstandard errichtet werden, beträgt der Anteil der Lüftungswärmeverluste bis zu 50% der Gesamtwärmeverluste. Neben der Minimierung der Transmissionswärmeverluste durch hochwärmegeämmte Außenbauteilkonstruktionen kommt daher insbesondere der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste eine entscheidende Bedeutung zu [Gertis I].

Der Luftaustausch, den man durch das Öffnen von Fenstern und Türen bzw. über sonstige Lüftungsöffnungen erreicht, wird bislang meist durch einen gebäudespezifischen Luftwechsel beschrieben. Er ist definiert als das Verhältnis vom Gesamtluftvolumenstrom zum Raum- bzw. Gebäudevolumen und berücksichtigt i.d.R. den Luftaustausch sowohl über die definierten Öffnungen als auch über Undichtheiten in der Gebäudehülle.

Derzeit existieren weder abgesicherte Erkenntnisse über den jahreszeitlichen Verlauf dieser Größe noch über die sich einstellenden mittleren Werte einer Periode.

Eine indirekte Messung des Luftwechsels erlauben die sogenannten Tracergas-Meßverfahren. Dabei wird eine geringe Menge eines Spurengases (engl.: Tracergas) in ein zu untersuchendes Raum- bzw. Gebäudevolumen eingebracht, und anschließend kann aus dem zeitlichen Gaskonzentrationsverlauf, der durch den Luftaustausch mit der Umgebung beeinflusst wird, der Luftwechsel berechnet werden. Zur Vorbereitung der im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchzuführenden Messungen wird eine Luftwechselmeßeinrichtung und eine Meteorologiestation aufgebaut, und es werden systematische Betrachtungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten der Meßverfahren angestellt.

Langzeituntersuchungen sollen es ermöglichen, den Einflußgrößen Windgeschwindigkeit und -richtung, Raum- und Außenlufttemperatur sowie unterschiedlichen Fensteröffnungen eindeutig einen resultierenden Luftwechsel zuzuordnen zu können.

Die Erarbeitung eines funktionalen Zusammenhangs im Sinne eines Rechenmodells wird angestrebt.



## 2. Einflußfaktoren auf den natürlichen Luftwechsel

Der Luftaustausch und somit auch die Lüftungswärmeverluste sind besonders schwierig zu messen, da sie von sehr vielen unterschiedlichen und z.T. instationären Einflußfaktoren bestimmt werden.

Dazu zählen die Baukonstruktion und die Bauausführung (Fugen, Luftdurchlässigkeit), die vorherrschenden meteorologischen Verhältnisse und die Topographie der Umgebung (thermische und strömungsbedingte Druckgradienten an der Gebäudeoberfläche), sowie das Nutzerverhalten (Nutzungsart, zeitliches Profil, Gewohnheiten). Hinzu kommt, daß die verschiedenartige und teilweise zufällige Verteilung der Leckage-Pfade die direkte Messung des Luftstromes an jeder Öffnung verhindert.

Bei Gebäuden, deren Dichtheit den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung entspricht, ist für die Höhe der Lüftungswärmeverluste fast ausschließlich das Lüftungsverhalten der Nutzer entscheidend [Hausladen]. Über die allgemeinen Ursache-Wirkungs-Beziehungen ist bisher allerdings noch zu wenig bekannt. Meßtechnische Untersuchungen, Befragungen von Nutzern und Beobachtungen, wie sie in einer großen Anzahl von Veröffentlichungen, z.B. [Conan] [Dubrul] [Fleury] [Geiger I u. II] [Künzel] [Mettler-Meibom I u. II] [Roulet I u. II] und [Wouters I u. II] wiedergegeben sind, zeigen die Vielzahl der Einflüsse hinsichtlich des Nutzerverhaltens auf.

Theoretisch fundierte und experimentell überprüfte Berechnungsregeln als Funktion aller wesentlichen Einflußparameter sind erst in Ansätzen vorhanden. Bild 2.1 stellt das Zusammenwirken der verschiedenen Parameter auf den Luftwechsel dar.

Für das Interesse an Messungen des Luftwechsels gibt es neben der einleitend erwähnten großen Bedeutung im Rahmen der Heizenergieeinsparung eine Reihe weiterer, teils hygienisch-gesundheitstechnischer, teils bauphysikalischer Gründe.

Ein ausreichender Luftwechsel ist wichtig zur Sicherstellung des Frischluftbedarfs der sich im Gebäude aufhaltenden Menschen und evtl. des Verbrennungsluftbedarfs von Gasetagenheizungen oder Öfen. Weiterhin dient der Luftaustausch zur Abfuhr von Feuchtigkeit. Er trägt somit dazu bei, ein behagliches Raumklima zu erhalten und Schimmelbildung an den Wänden oder schwerwiegenderen Bauschäden vorzubeugen. Die Kenntnis des Luftwechsels ist Bedingung, wenn eine Abschätzung der Raumluftqualität vorgenommen werden soll.

Die Konzentration unerwünschter bzw. schädlicher Luftinhaltsstoffe, die bei Verringerung des Luftwechsels steigt, darf bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Für viele Stoffe sind maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK) vorgegeben.

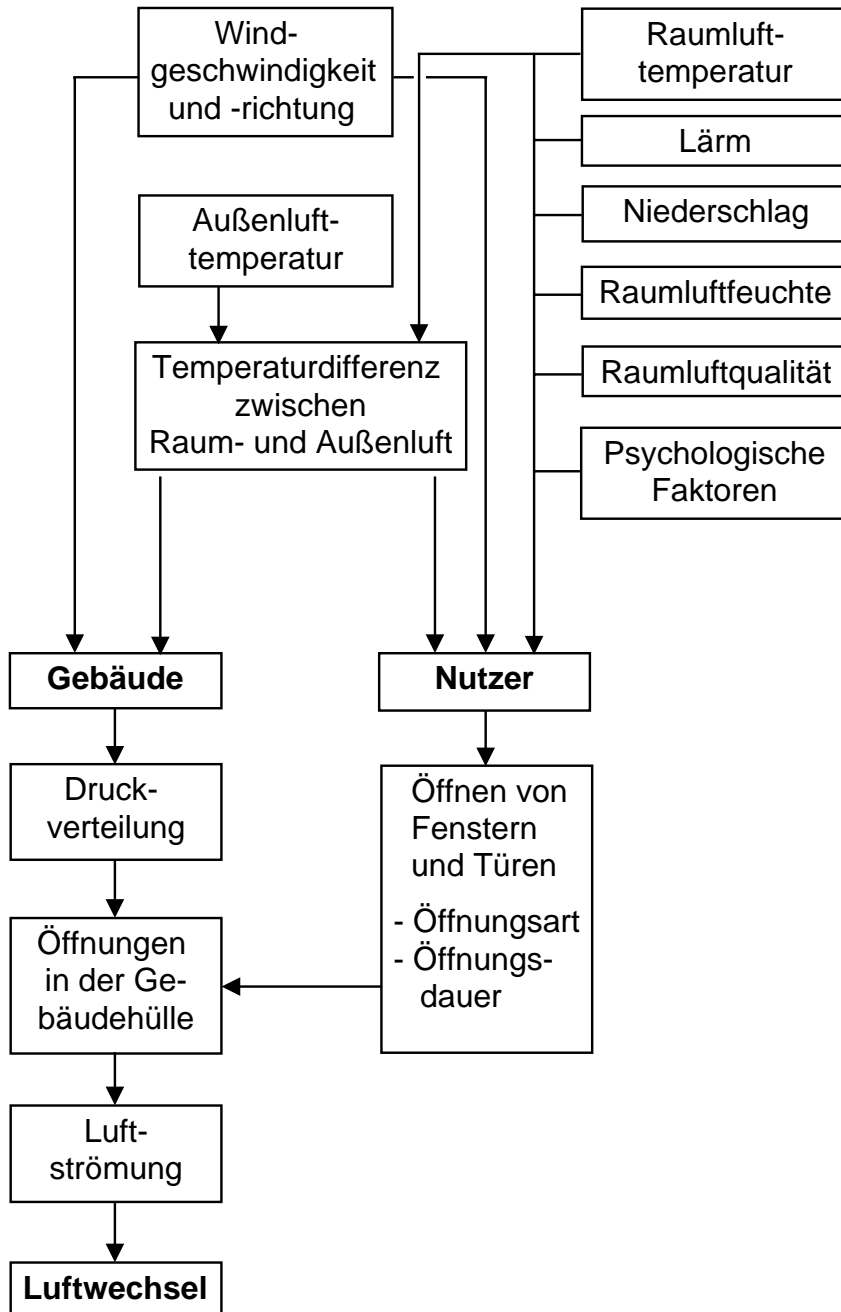


Bild 2.1: Einflussfaktoren auf den Luftwechsel. Modifiziert aus [Heidt].

Bei der Belastung von Räumen waren in den vergangenen Jahren zwei gegenläufige Tendenzen zu beobachten. Einerseits führten energieökonomische und schallschutztechnische Forderungen zu einer immer dichteren Gebäudehülle, einer drastischen Verringerung der Fugendurchlässigkeit und somit zu einer starken Einschränkung des natürlichen Luftwechsels. Andererseits nahm - z.T. infolge veränderter Nutzungsbedingungen - die Beaufschlagung der Raumluft durch höhere Wasserdampfkonzentrationen aus Bad und Küche, Schadstoffemissionen aus Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen sowie durch Haushaltschemikalien zu, die Qualität der Innenraumluft verschlechterte sich oft erheblich. Die Einhaltung hygienischer und bauphysikalischer Forderungen wurde schwierig. Ausführungen zu dieser Problematik sind u. a. in [Gertis II] [Hauser I] [Hausladen] zu finden.

Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels in ausgeführten Wohnungen ergaben in einem erheblichen Umfang der angetroffenen Räume Luftwechselzahlen in der Größenordnung von nur 0,3 pro Stunde. Es wird davon ausgegangen, daß dies zu unangemessen hohen Schadstoffkonzentrationen führen kann [Wegner].

In [Erhorn] wird für durchschnittliche Nutzungsbedingungen eine permanente Grundlüftung mit einem Luftwechsel von 0,5 bis 0,8 h<sup>-1</sup> für notwendig gehalten. Es wird die verbindliche Festlegung eines Mindest-Luftaustausches bzw. einer Mindest-Fugendurchlässigkeit in künftigen Normenwerken gefordert.

Diese Forderung wird in der Praxis oftmals so interpretiert, daß die Gebäudehülle undicht ausgeführt sein kann. Die Folge hiervon sind Feuchteschäden in Bauteilen aufgrund von konvektivem Wasserdampftransport und unzulässig hohe Wärmeverluste insbesondere bei Gebäuden, die mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet sind [Hauser II]. Eine Grundlüftung muß daher so realisiert werden, daß der Luftaustausch über definierte Lüftungsöffnungen stattfindet. Die wärmeaustauschende Hüllfläche des Gebäudes ist insgesamt dicht auszuführen.

Einschlägige Normen, Verordnungen und Rechenverfahren behandeln den jeweils zu berücksichtigenden Luftaustausch unterschiedlich. Der planmäßige Außenluftvolumenstrom, welcher zur Auslegung von Lüftungstechnischen Einrichtungen dient, ist in [DIN 1946] bei freier Lüftung mit 60 bis 120 m<sup>3</sup>/h angegeben. In [DIN 4701] wird bei der Wärmebedarfsrechnung von einem Mindestluftwechsel von 0,5 h<sup>-1</sup> ausgegangen. Das Nachweisverfahren der Wärmeschutzverordnung [WSchVO] geht bei der Bestimmung des Lüftungswärmebedarfs von einem 0,8-fachen Luftwechsel bei freier Lüftung aus. Dieser Wert wird auch bei der Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden gem. [DIN 4108] und in dem Energiekennzahlverfahren [Hauser III] in Ansatz gebracht.

### 3. Tracergasmeßtechniken zur Ermittlung des Luftwechsels

#### 3.1 Meßprinzip und mathematisch-physikalische Modellbildung

Die meßtechnische Ermittlung des Zu- und Abluftvolumenstroms bzw. des Luftwechsels erfolgt durch ein indirektes Meßverfahren. Dies geschieht dadurch, daß in die betrachtete Meßzone ein geeignetes Tracergas (Spurengas) eingebracht wird. Der Verlauf der Tracergaskonzentration innerhalb der Meßzone wird aufgezeichnet und anschließend läßt sich aus dem ermittelten zeitlichen Konzentrationsverlauf mit Hilfe eines mathematischen Auswerteverfahrens der Zuluftvolumenstrom  $\dot{V}_{zu}$  bzw. der Luftwechsel  $n$  berechnen.

Für die Auswertung der Konzentrationsmeßwerte muß ein mathematischer Ansatz vorliegen, der die physikalischen Verhältnisse möglichst genau beschreiben sollte. Im folgenden wird in Anlehnung an [Roulet III] ein allgemeines mathematisch-physikalisches Modell für eine einzelne Meßzone und Messungen mit einem Tracergas aufgestellt. Eine Aufgliederung in die unterschiedlichen wechselseitigen Luftaustauschraten mit den verschiedenen, die Meßzone umgebenden Gebäudeteilen wird dabei nicht vorgenommen, d.h. es kann nach diesem Ansatz nur ein Gesamtluftwechsel für die Meßzone bestimmt werden.

Bild 3.1 gibt eine Übersicht über die in eine Meßzone ein- und austretenden Tracergas-Massenströme.

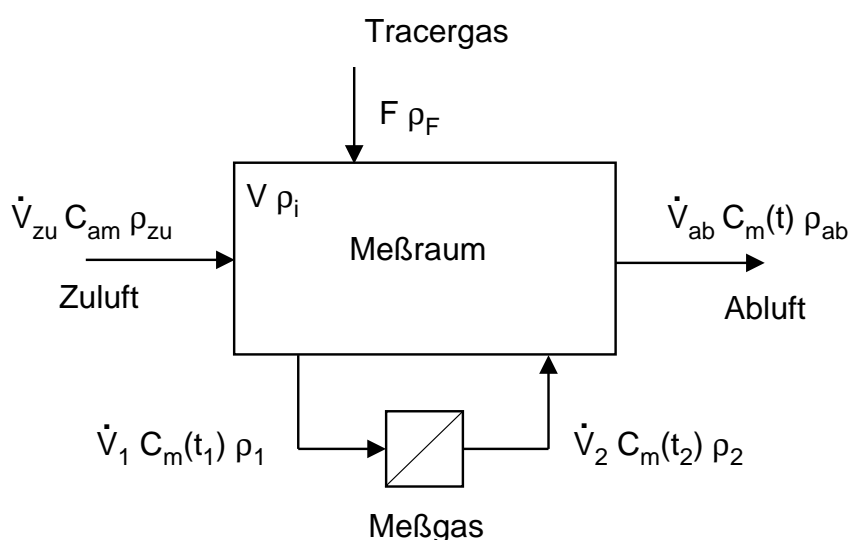


Bild 3.1: Modell für eine Meßzone und ein Tracergas.

Eine Bilanzierung der Tracergas-Massenströme liefert die Kontinuitätsgleichung

$$V \rho_i \frac{dC_m(t)}{dt} = F \rho_F + \dot{V}_{zu} \rho_{zu} C_{am} - \dot{V}_{ab} \rho_{ab} C_m(t) \quad (3.1)$$

Dabei ist

- $C_m(t)$  die Tracergaskonzentration zur Zeit  $t$  (Tracergasmasse / Luftmasse)
- $C_{am}$  die Tracergaskonzentration der Außenluft (Masse / Masse)
- $\dot{V}_{zu}$  die zu einem Zuluftvolumenstrom zusammengefaßten Einzelzuströme in die Meßzone
- $\rho_{zu}$  die Dichte der Zuluftströme vor dem Eintritt in die Meßzone
- $\dot{V}_{ab}$  die zu einem Abluftvolumenstrom zusammengefaßten einzelnen Abluftströme
- $\rho_{ab}$  die Dichte der aus der Meßzone abströmenden Luft
- $F$  der Tracergaszustrom
- $\rho_F$  die Dichte des Tracergases vor dem Eintritt in die Meßzone
- $V$  das effektive Raumvolumen der Meßzone
- $\rho_F$  die Dichte der Luft innerhalb der Meßzone

Da der bei der Konzentrationsmessung kontinuierlich aus der Meßzone entnommene und an sie zurückgeführte Massenstrom  $\dot{V} C_m(t) \rho$  gegenüber den anderen auftretenden Massenströmen sehr klein ist, kann die Zeitdifferenz  $\Delta t = t_2 - t_1$  zwischen den Zeitpunkten der Entnahme ( $t_1$ ) und der Rückführung ( $t_2$ ) der Luftprobe und die nur geringfügige Differenz zwischen  $\rho_1$  und  $\rho_2$  vernachlässigt werden. In jedem Fall sind der entnommene und der rückgeführte Massenstrom gleich, sie können somit aus der Massenbilanz herausgenommen werden.

Es wird davon ausgegangen, daß die Dichte der Luft im Innenraum, die Dichte sämtlicher ein- und austretender Massenströme, der Tracergaszustrom sowie die Zuluft- und Abluftvolumenströme während der Zeitdauer eines Meßintervalls konstant sind. Das gleiche gilt für die Umgebungskonzentration  $C_{am}$  und das Volumen der Zone.

Weiterhin soll gelten, daß die Dichte  $\rho_{zu}$  der an verschiedenen Stellen der Meßzone eintretenden Luftströme gleich ist und diese jeweils die gleiche Tracergas-Umgebungskonzentration  $C_{am}$  mit sich führen, so daß sie zu einem Zuluftmassenstrom zusammengefaßt werden können. Analog dazu wird vorausgesetzt, daß die Tracergaskonzentration  $C_m(t)$  und die Dichte  $\rho_{ab}$  in allen aus der Meßzone austretenden Luftströmen zu jeder Zeit  $t$  gleich sind, so daß sie zu einem Abluftmassenstrom zusammengefaßt werden können.

Um von der Annahme ausgehen zu können, die Tracergaskonzentration  $C_m(t)$  sei während einer Messung zu jeder Zeit in allen Abluftströmen gleich, muß zu jeder Zeit  $t$  eine homogene Verteilung des Tracergases innerhalb der Meßzone vorliegen.

Für die Massenerhaltung gilt

$$\sum \dot{m}_{ab} = \sum \dot{m}_{zu} \quad (3.2)$$

und somit für das in Bild 3.1 dargestellte System

$$\dot{V}_{ab} \rho_{ab} = \dot{V}_{zu} \rho_{zu} + F \rho_F \quad (3.3)$$

Das Einsetzen von (3.3) in (3.1) liefert

$$V \frac{dC_m(t)}{dt} = F \frac{\rho_F}{\rho_i} + \dot{V}_{zu} \frac{\rho_{zu}}{\rho_i} C_{am} - \left( \dot{V}_{zu} \frac{\rho_{zu}}{\rho_i} + F \frac{\rho_F}{\rho_i} \right) C_m(t) \quad (3.4)$$

Da der Term

$$F \frac{\rho_F}{\rho_i} C_m(t)$$

aufgrund seines sehr geringen Betrages vernachlässigt werden kann, folgt mit der Vereinfachung

$$\frac{\rho_{zu}}{\rho_i} = \frac{\rho_{zu} R_i T_i}{\rho_i R_{zu} T_{zu}} \approx \frac{T_i}{T_{zu}} \quad (3.5)$$

$$V \frac{dC_m(t)}{dt} = F \frac{\rho_F}{\rho_i} + \dot{V}_{zu} \frac{T_i}{T_{zu}} (C_{am} - C_m(t)) \quad (3.6)$$

Die Umformung der massebezogenen Konzentrationen auf Volumenbezug ergibt

$$V \frac{dC(t)}{dt} = F + \dot{V}_{zu} \frac{T_i}{T_{zu}} (C_a - C(t)) \quad (3.7)$$

oder mit der Abkürzung

$$\Delta C(t) = C(t) - C_a$$

und umgestellt

$$\dot{V}_{zu} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left( F - V \frac{dC(t)}{dt} \right) \frac{1}{\Delta C(t)} \quad (3.8)$$

### 3.2 Voraussetzungen bei der Durchführung von Tracergas-Messungen

Der Erfolg von Luftwechselfmessungen mit Hilfe von Tracergasen hängt von der Erfüllung der folgenden Voraussetzungen ab:

- a) Bei der Durchführung jeder Luftwechselfmessung ist eine vollständige Durchmischung innerhalb des gesamten Volumens des untersuchten Raumes, Gebäudeteils bzw. Gebäudes während der gesamten Meßdauer sicherzustellen.

Vollständige Durchmischung bedeutet, daß die Tracergaskonzentration zu jeder Zeit und an jedem Punkt innerhalb der Meßzone gleich ist (Homogenität der Tracergaskonzentration), d.h. das eingebrachte Tracergas wird nach Eintritt in den Versuchsraum sofort und vollständig mit der Luft vermischt. Die in die Meßzone eintretenden Luftströme sollen nicht die Homogenität beeinträchtigen, auch hier wird also von einer sofortigen und vollständigen Durchmischung ausgegangen.

In [Roulet III] werden zwei Kriterien für eine vollständige Durchmischung genannt, zum einen bezüglich der Zeit, zum anderen bezüglich der Luftvolumenströme:

1. Das mittlere lokale Alter der Luft innerhalb der Meßzone ist gleich der nominalen Zeitkonstante  $\tau_n$ , dem Kehrwert des Luftwechsels. Unvollständige Durchmischung bedeutet, daß das mittlere lokale Alter der Luft an verschiedenen Stellen im Raum unterschiedlich ist, es kann größer oder kleiner sein als die nominale Zeitkonstante.
2. Der lokale Abluftvolumenstrom ist in jedem Punkt der Zone gleich dem Zuluftvolumenstrom.

Es müssen immer beide Kriterien erfüllt sein.

Eine unvollständige Mischung kann vorkommen, wenn die Luftbewegung von Strömungswiderständen behindert wird, oder wenn Stratifikationseffekte auftreten. Eine unvollständige Mischung kann sich ebenfalls ergeben, wenn eindringende Luft die vorhandene verdrängt, ohne sich mit ihr zu vermischen, oder wenn aus der Meßzone ausströmende Luft an anderer Stelle wieder in die Meßzone eindringt.

Die Folge ist eine räumliche Variation der Tracergaskonzentration, welche bewirkt, daß gleichzeitig an verschiedenen Stellen in der Meßzone durchgeführte Messungen unterschiedliche Luftwechsel ergeben. So bleibt unklar, wie hoch der durchschnittliche Luftwechsel für die gesamte Meßzone, auch als "globaler" Luftwechsel bezeichnet, ist.

Eine verzögert ablaufende Durchmischung kann wegen der in der Regel unterschiedlichen Entfernung der einzelnen Proben-Entnahmestellen (Meßstellen) von der Tracergas-Einblasstelle ebenfalls zu Schwierigkeiten führen.

- b) Veränderungen der Tracergaskonzentration in der Meßzone sollen allein durch Zufuhr von Tracergas oder durch Abtransport mit der Raumluft zustande kommen, d.h. es dürfen keine chemische Zersetzung des Tracergases oder Reaktionen mit anderen Stoffen stattfinden. Ab- und Desorption des Tracergases an Raumeinrichtungen und Raumumschließungsflächen muß ausgeschlossen sein.
- c) Existieren innerhalb der Meßzone eingeschlossene Luftvolumina - z.B. in Möbeln - oder ist die Meßzone durch Türen in einzelne Räume unterteilt, so sind diese vor Beginn der Messung zu öffnen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, eingeschlossene Luftvolumina gasdicht zu verschließen und sie vom aufgemessenen effektiven Luftvolumen der Meßzone zu subtrahieren. Diese Maßnahmen sind notwendig, um eine zu jeder Zeit gleichmäßige Verteilung des Tracergases im gesamten, als Meßzone definierten Luftvolumen zu erreichen. Werden die genannten Maßnahmen nicht ergriffen, können durch verzögertes Eindringen des Tracergases in die eingeschlossenen Luftvolumina Verfälschungen der Meßergebnisse auftreten.
- d) Der atmosphärische Druck soll während der Meßdauer weitgehend konstant bleiben. Diese Forderung ist meist leicht zu erfüllen, da der atmosphärische Druck innerhalb kurzer Zeitperioden normalerweise nur um  $\pm 0.01$  % und während eines Tages um  $\pm 1$  % schwankt [Roulet III]. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Meßergebnissen sollte der atmosphärische Druck vor einer Messung notiert und bei Langzeitmessungen während der gesamten Meßdauer aufgezeichnet werden.
- e) Die Einbringung von Tracergas in die Meßzone soll die Dichte der Raumluft nicht signifikant verändern. Da die Konzentration des eingebrachten Tracergases meist unter  $10^{-4}$  Volumenanteilen liegt, ist diese Forderung im allgemeinen erfüllt.

Um eine vollständige Durchmischung (Homogenität) des Luft-Tracergas-Gemisches zu erreichen, wird in der Regel ein Ventilator eingesetzt. In größeren Räumen und bei der Ermittlung des Luftwechsels eines gesamten Gebäudes oder eines größeren Gebäudeabschnittes kommen meist mehrere über die gesamte Meßzone verteilte Ventilatoren zum Einsatz. Das Schaffen von künstlichen Strömungsbedingungen durch die Ventilatoren kann evtl. die Infiltration beeinflussen und so die Luftwechselfmessung verfälschen.



Ist ein mechanisches Lüftungssystem vorhanden, kann das Tracergas auch in den Zuluftkanal eingeblasen werden.

Bei Messungen des Luftwechsels für ein komplettes Gebäude wird es oft notwendig sein, das Meßobjekt in mehrere einzeln zu betrachtende Zonen zu unterteilen, da es nur schwer zu erreichen ist, die genannten Bedingungen zu jeder Zeit für das gesamte Gebäude zu erfüllen. Zudem bleiben bei einem Verzicht auf eine geeignete Unterteilung in Zonen die zahlreichen zwischen den einzelnen Räumen oder Gebäudeteilen stattfindenden Luftaustauschraten unberücksichtigt, und es wird so ein unrealistischer Außenluftwechsel für das Gesamtgebäude ermittelt. Zur Ermittlung der Luftaustauschraten zwischen einzelnen Zonen sind Messungen mit mehreren Tracergasen prädestiniert (Multi-Tracer-Technik).

Hinweise zur Problematik der Mischung in Wohnhäusern, in mehrfach unterteilten Gebäuden und in Hallen werden in [Hartmann] [Grot] gegeben. In [Raatschen I] [Roulet III] [Amara] [Brouns] [Dorer] finden sich Angaben zur Messung des Luftaustausches zwischen zwei oder mehreren Zonen mit einem oder mehreren Spurengasen.

### **3.3 Beschreibung einzelner Tracergas-Methoden**

#### **3.3.1 Konzentrationsabfall-Methode**

Bei dieser am häufigsten angewandten Methode, der "Abklingmethode", wird Tracergas vor Beginn der Messung in den Versuchsraum eingeblasen, gründlich verwirbelt und mit der Raumluft vermischt, so daß zu Beginn der Messung im gesamten Raum eine weitgehend gleichmäßige Tracergasanfangskonzentration vorherrscht. Durch von außen oder aus anderen Gebäudeteilen in den Meßraum eindringende Luft und Abtransport des Luft-Tracergas-Gemisches erfolgt ein Konzentrationsabfall, der in Form von Konzentrations-Zeit-Meßwertepaaren aufgezeichnet wird. Über die mathematische Auswertung dieser Meßwerte läßt sich anschließend ein Durchschnittswert für den Luftwechsel  $n$  berechnen.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, können Veränderungen von Randbedingungen während einer Messung, wie z.B. das Öffnen von Fenstern oder Türen und Witterungswechsel, den Luftwechsel stark beeinflussen. Dies kann den Verlauf des Tracergas-Konzentrationsabfalls, der sich normalerweise zu einer exponentiell abfallenden Kurve ergibt, beeinflussen.

Die Kenntnis der in den Raum eingeblasenen Tracergasmenge ist nicht notwendig. Sie hängt von der verwendeten Gasart, dem Volumen des Prüfraumes und der gewünschten Größe der Anfangskonzentration ab. Die Anfangskonzentration

sollte 90 bis 100% der Meßbereichs-Obergrenze des eingesetzten Gasanalytators betragen.

Für die Berechnung des Außenluft-Volumenstromes muß das Prüfraumvolumen bekannt sein, nicht aber zur Ermittlung des Luftwechsels  $n$ .

Da die zu Beginn der Messung im Prüfraum vorhandene Tracergasmenge nach einer begrenzten Zeit abtransportiert ist, eignet sich die Konzentrationsabfall-Methode am ehesten für Messungen von geringen bis mittleren Luftwechseln und für relativ kurze Meßzeiträume.

Um zu Durchschnittswerten über längere Zeiträume zu kommen, kann der Versuch bei anderen Außenbedingungen wiederholt werden, oder es wird nach dem Abfallen der Konzentration auf einen Minimalwert sofort wieder neues Spurengas eingeblasen, verwirbelt und der Konzentrationsverlauf gemessen, d.h. die Messungen folgen direkt aufeinander.

### **3.3.2 Konstant-Emissions-Methode**

Bei diesem auch als "Methode mit konstanter Tracergaszufuhr" bezeichneten Meßverfahren wird ebenfalls der Konzentrationsverlauf über der Zeit gemessen. Im Gegensatz zur Abklingmethode wird aber die Tracergaszufuhr in den Prüfraum erst bei Versuchsbeginn gestartet und dann über den gesamten Meßzeitraum konstant gehalten. Die Anfangskonzentration kann dabei gleich oder größer Null sein.

Die Forderung nach sofortiger und vollständiger Durchmischung ist bei dieser Methode schwieriger zu erfüllen, da hier das Tracergas während der Aufnahme von Meßwerten eingeblasen und verwirbelt wird, während bei der Konzentrationsabfall-Methode die Durchmischung vor dem eigentlichen Meßbeginn erfolgt. Es muß immer mit einer gewissen Verzögerung bis zur Erfassung der durch das ständige Einblasen hervorgerufenen Konzentrationsänderung im Raum gerechnet werden. Diese Verzögerung wird beim Absaugen an mehreren Meßstellen jeweils verschieden sein, da sie unterschiedlich weit vom Einblasort entfernt liegen.

Die Methode mit konstanter Tracergaszufuhr ist besonders zur Durchführung längerfristiger Messungen und Messungen größerer Luftwechsel geeignet, da ein Konzentrationsabfall und dementsprechend kurze Meßperioden durch eine passend dimensionierte ständige Injektion von Tracergas vermieden werden. Die mögliche Meßdauer wird letztlich nur durch die zur Verfügung stehende Tracergasmenge begrenzt. Da der Massenstrom des Tracergases möglichst genau gemessen werden muß, ist diese Methode etwas aufwendiger als die Abklingmethode.

Der vorzugebende Tracergas-Volumenstrom ist abhängig vom Raumvolumen  $V$ , dem zu erwartenden Luftwechsel  $n$  und der erwünschten maximalen Konzentration  $C_{\max}$ . Ist der tatsächliche Luftwechsel geringer als erwartet, und die gewählte Tracergas-Injektionsrate deshalb zu groß, besteht das Risiko, daß sich eine zu hohe Tracergaskonzentration in der Meßzone einstellt.

Bleibt neben dem Tracergaszustrom in den Prüfraum auch der Außenluftvolumenstrom und damit der Luftwechsel über den gesamten Meßzeitraum konstant, stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand ein, die Tracergaskonzentration  $C$  verändert sich ebenfalls nicht mehr. Der Luftwechsel kann dann aus diesem asymptotischen Konzentrations-Grenzwert  $C_{\infty}$ , dem Raumvolumen  $V$  und der konstanten Tracergaszufuhr  $F$  berechnet werden, ohne eine mathematische Auswertung der Konzentrations-Zeit-Meßwerte vornehmen zu müssen.

Ist der Luftwechsel über dem Meßzeitraum nicht konstant oder verhindern andere Störeffekte, daß sich der Gleichgewichtszustand einstellt, muß  $n$  wie bei der Abklingmethode über ein geeignetes mathematisches Auswerteverfahren aus den Meßwerten berechnet werden. Der gesamte Meßzeitraum ist dafür in einzelne Zeitabschnitte, in denen der Luftwechsel jeweils weitgehend konstant ist, zu unterteilen. Schwankungen des Luftwechsels um einen Mittelwert, durch die ein Streuen der Konzentrationsmeßwerte auftritt, sind dabei tolerierbar, da das Auswerteverfahren den Luftwechsel aus einer Approximation an die Meßwerte ermittelt.

Wegen der zusätzlichen Abhängigkeit des Luftwechsels vom effektiven Volumen  $V$  und der Injektionsrate  $F$  ist bei der Methode mit konstanter Tracergaszufuhr ein größerer Meßfehler zu erwarten als bei der Abklingmethode. Bleibt der Luftwechsel während der Messung konstant und stellt sich der Grenzwert  $C_{\infty}$  ein, kann  $n$  auf zwei voneinander unabhängigen Wegen ermittelt werden und durch Vergleich eine Aussage über die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse gemacht werden.

Der Konzentrationsverlauf der Methode mit konstanter Tracergaszufuhr entspricht im idealen Fall und für eine Anfangskonzentration = 0 dem Verlauf der Sprungantwort des betrachteten Meßsystems, wobei der konstante Betrag der Einganggröße  $F$  der Sprunghöhe und  $C_{\infty}$  dem Übertragungsfaktor entspricht.

### 3.3.3 Tracergas-Puls-Methode

Hier wird zur Zeit  $t = 0$ , also zu Beginn der Messung, kurzzeitig eine kleine Menge Tracergas in den Prüfraum eingebracht und sofort gründlich mit der Raumluft durchmischt. Kurzzeitig heißt, daß die Einspritzzeit wesentlich kürzer ist als die nominale Zeitkonstante. Der aufgezeichnete zeitliche Konzentrationsverlauf entspricht der Impulsantwort des betrachteten Systems.

Auch bei dieser Methode ergibt sich gegenüber der Abklingmethode eine zusätzliche Fehlerquelle, da die in den Raum eingespritzte Tracergasmenge in die Berechnung des Luftwechsels einfließt. Ansonsten bestehen große Ähnlichkeiten zu der Konzentrationsabfall-Methode. Im Vergleich dazu bietet sie als einzigen Vorteil einen niedrigeren Tracergasverbrauch. Aufgrund der zusätzlichen Fehlerquelle bei der Messung und des aufwendigen Auswerteverfahrens wird sie nur selten angewendet.

### **3.3.4 Konstant-Konzentrations-Methode**

Wie bei der Konzentrationsabfall-Methode wird vor Beginn der Messung Tracergas in den Prüfraum geleitet und gründlich mit der Luft vermischt, bis die gewünschte Konzentration erreicht ist. Während der Messung wird dieser Sollwert durch eine geeignete Regeleinrichtung konstant gehalten. Gaskonzentration und Tracergaseintrag werden über die Zeit gemessen und aufgezeichnet.

Bei optimalem Regelverhalten, d.h. beim Erreichen einer hohen Konstanz der Tracergaskonzentration, sind der Luftzustrom und damit auch der Luftwechsel zu der Tracergas-Einblasrate proportional, was die Auswertung von Meßergebnissen sehr vereinfacht. Zudem stellen Änderungen von Randbedingungen während der Messung kein großes Problem dar, wenn die sich daraus ergebenden Konzentrationsänderungen sehr schnell erfaßt und korrigiert werden. So eignet sich diese Methode hervorragend zur vollautomatischen, langfristigen Aufzeichnung des veränderlichen Luftwechsels. Das Volumen muß nur für die Bestimmung des Luftwechsels  $n$  bekannt sein, nicht aber für die Ermittlung des Außenluftstromes.

Die experimentelle Ausstattung ist jedoch im Vergleich mit den anderen Methoden deutlich aufwendiger und teurer. U.a. wird ein sehr genaues Meßgerät zur kontinuierlichen Erfassung des Tracergas-Volumenstromes sowie eine Regelung und ein elektronisch exakt steuerbares Feindosierventil zur kontinuierlichen Einstellung des Tracergasstromes benötigt.

### **3.4 Nachteile und Grenzen der Tracergas-Meßverfahren**

Der Hauptnachteil der Ermittlung des Luftwechsels über Tracergas-Messungen liegt darin, daß aus Einzelmessungen im Grunde keine allgemeingültigen Aussagen über den Luftwechsel in einem Gebäude oder Gebäudeteil gemacht werden können, da die Meßergebnisse zu stark von sich verändernden und nicht vorausberechenbaren Randbedingungen abhängen, wie u.a. der Windgeschwindigkeit und -richtung, den Innenraum- und Umgebungstemperaturen - und auch den Temperaturen in benachbarten Räumen. Sie sind deshalb nicht jederzeit reproduzierbar.

Der Aufwand für die notwendigen längerfristigen Messungen ist erheblich und die umfangreiche und aufwendige Instrumentierung muß während der gesamten Meßdauer am Meßort (z.B. Wohngebäude) verbleiben. Eine Alternative stellt die Entnahme von Luftproben in Flaschen oder Absorptionsröhren während des Versuchs dar, die nach dessen Abschluß im Labor analysiert werden (Passive Sampling Method) [Raatschen II] [Stymne].

Ein weiterer Nachteil der Tracergas-Methoden ist, daß das für eine gleichmäßige Verteilung der Konzentration des Tracergases im Prüfraum erforderliche Mischen einen künstlichen Zustand erzeugt, der unter Umständen die Resultate beeinflusst. Bei längerfristigen Messungen wird z.T. unabhängig von der verwendeten Methode eine Verwirbelung durch im Raum aufgestellte Ventilatoren während der gesamten Meßdauer notwendig sein, insbesondere wenn sich die Dichte des verwendeten Tracergases deutlich von der Dichte der Luft unterscheidet. Der Dichteeinfluß ist zu vernachlässigen, wenn die Gaskonzentration ausreichend klein gewählt wird [Raatschen II].

Zudem ist die Kenntnis des Luftwechsels eines Raumes nur sehr bedingt zur Abschätzung der Raumluftqualität und der durch Schadstoffe bedingten Risiken geeignet, da er keine Auskunft über die Luftverteilung und deshalb z.B. auch nicht über zeitliche und räumliche Schwankungen von Schadstoffbelastungen in einem Raum oder Gebäude gibt. Es lassen sich somit keine Aussagen über die Effizienz des Luftaustausches in unterschiedlichen Bereichen einer untersuchten Meßzone ableiten. In [Raatschen I] wird deshalb auch die Ermittlung des globalen Luftwechsels als Durchschnittswert für Räume oder gar ganze Gebäude in Frage gestellt.

Zur Beschreibung der Raumluftqualität und der "Güte" der Raumbelüftung sind Kenngrößen wie der "Luftaustauschwirkungsgrad" und die "Lüftungseffektivität" wesentlich aussagekräftiger.

Der Begriff der Lüftungseffektivität bezieht sich u.a. auf die Effizienz des Luftaustausches bzw. der Schadstoffabfuhr in bestimmten Bereichen - z.B. in Aufenthaltszonen - in einem untersuchten Raum. Der Luftaustauschwirkungsgrad stellt ein Maß für den Grad der Durchmischung von Frischluft und Raumluft dar. Es lassen sich durch ihn Aussagen über die Art des Strömungsverhaltens im Raum ableiten. Bei Messungen zur Ermittlung des Luftwechsels wird dagegen durch das künstliche Herbeiführen einer homogenen Durchmischung eine Aussage über die sich natürlich einstellende Luftverteilung und Strömungsbedingungen unmöglich gemacht.

In [Raatschen I] wird das "Konzept vom Alter der Luft" erläutert, nach dem durch Anwendung von Spurengasmessungen die genannten Kenngrößen ermittelt wer-

den können. Nachteil ist allerdings, daß Messungen des "Alters der Luft" immer das Vorhandensein eines Abluftkanals erfordern, durch den die gesamte Raumluft abströmt und in welchem die Abluftkonzentration gemessen werden kann. In einem Raum mit ausschließlich natürlicher Lüftung ist also nur der globale Luftwechsel, nicht aber das durchschnittliche Alter der Raumluft oder der Luftaustauschwirkungsgrad meßbar.

Ein weiteres grundlegendes Problem stellt die in den einschlägigen Vorschriften erhobene Forderung nach einem gesonderten Nachweis des reinen Außenluftwechsels bzw. von reinen Außenlufttraten dar. Der Außenluftwechsel bezieht sich ausschließlich auf das mit der Gebäudeumgebung ausgetauschte Luftvolumen.

Die Einhaltung dieser Forderung ist wichtig, um aus den Ergebnissen der Messungen wenigstens ein Mindestmaß an Aussagen bezüglich der Raumluftqualität ableiten zu können.

Der in der Regel auftretende Luftaustausch zwischen Gebäudeteilen sowie das Wiedereintreten von Luft, z.B. in Folge von Kurzschlußströmungen an Gebäudeöffnungen, können bewirken, daß bei Messungen ein vom reinen Außenluftwechsel abweichender Gesamtluftwechsel erfaßt wird. Verwertbare Ergebnisse sind deshalb nur durch eine für den jeweils vorliegenden Fall günstige Wahl der Entnahmeorte der zu untersuchenden Luft, der Anzahl der Entnahmestellen und der dabei zulässigen Randbedingungen im Raum zu erwarten.

Zu den dabei maßgeblichen Randbedingungen gehören die Luftströmungen im Raum. Sie werden hervorgerufen durch natürliche Einwirkungen, wie Temperaturdifferenzen zwischen Innenraum- und Außenluft sowie durch Winddruck, oder sie werden künstlich durch im Prüfraum installierte Ventilatoren oder mechanische Belüftung erzeugt. Im Zweifelsfall muß deshalb parallel zur Luftwechselmessung eine qualitative Einschätzung der Raumluftströmung im Prüfraum vorgenommen werden. Das kann bei Kenntnis bestimmter Außenbedingungen über die Berechnung oder die qualitative Messung der Raumströmung erfolgen. Der Aufwand zur Ermittlung eines Außenluftwechsels kann damit erheblich steigen.

Trotz dieser Probleme stellen Tracergasmessungen aber letztlich die einzige praktisch verfügbare Möglichkeit dar, den natürlichen Luftwechsel in einem Gebäude zu bestimmen.

Das in [Ducarme] beschriebene Meßverfahren, welches auf einer Wärmebilanz beruht, ist aufgrund der komplexen Randbedingungen ausschließlich in speziellen Versuchsräumen anwendbar.

### 3.5 Auswerteverfahren

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen beruhen auf den Prinzipien der Konstant-Konzentrations- und Konzentrationsabfall-Methode. Für diese beiden Methoden werden im folgenden die hier angewandten Auswerteverfahren beschrieben.

#### 3.5.1 Konstant-Konzentrations-Methode

Für die Auswertung der in Kapitel 3.1 aufgeführten systembeschreibenden Differentialgleichung wird das in [Roulet III] dargestellte Integralverfahren verwendet. Hierbei wird die Mittelwertbildung über eine Zeitperiode  $\Delta t$ , die dem Abstand zwischen zwei oder mehreren Messungen entspricht, vorgenommen. Die allgemeine Form der zeitlichen Mittelwertbildung lautet

$$x_m = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} x(t) dt \quad (3.9)$$

Führt man die Mittelwertbildung gem. obiger Definition für Gleichung 3.8 ein, folgt

$$\int_t^{t+\Delta t} \dot{V}_{zu} dt = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \int_t^{t+\Delta t} \frac{F}{\Delta C(t)} dt - V \int_t^{t+\Delta t} \frac{dC(t)}{\Delta C(t)} \right\} \quad (3.10)$$

und daraus

$$\int_t^{t+\Delta t} \dot{V}_{zu} dt = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \int_t^{t+\Delta t} \frac{F}{\Delta C(t)} dt - V [\ln \Delta C(t + \Delta t) - \ln \Delta C(t)] \right\} \quad (3.11)$$

Nach Division der Gleichung durch  $\Delta t$  ergibt sich der mittlere Zuluftvolumenstrom aus

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \frac{F_m}{\Delta C_m(t)} + \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (3.12)$$

mit

$$\Delta C_m(t) = \frac{\Delta C(t) + \Delta C(t + \Delta t)}{2}$$

Gleichung 3.12 stellt ein allgemeines Auswerteverfahren zur Ermittlung des mittleren Zuluftvolumenstroms bzw. des mittleren Luftwechsels dar. Vereinfacht man die Betrachtungen dahingehend, daß bei der Messung ein Tracergas Verwendung findet, das in der Umgebungsluft nicht enthalten ist, d.h.  $C_a = 0$ , folgt aus Gleichung 3.12

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \frac{F_m}{C_m(t)} + \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{C(t)}{C(t + \Delta t)} \right\} \quad (3.13)$$

Unter Voraussetzung eines idealen Regelsystems und somit der Annahme einer exakt konstanten Konzentration während der Messung kann Gleichung 3.13 nochmals vereinfacht werden

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{F_m}{C(t)} \quad (3.14)$$

### 3.5.2 Konzentrationsabfall-Methode

Bei der Durchführung der Konzentrationsabfall-Methode wird kein Tracergas in die Meßzone eingeblasen, also  $F = 0$ . Mit der Definition

$$n_m = \frac{\dot{V}_{zu,m}}{V} \quad (3.15)$$

ergibt sich damit aus Gleichung 3.12 der mittlere Luftwechsel zu

$$n_m = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (3.16)$$



## 4. Versuchsaufbau

### 4.1 Versuchsgebäude und Meßraum

Die meßtechnischen Untersuchungen erfolgen in einem für experimentelle Untersuchungen vorgesehenen Versuchsgebäude des Fachgebiets Bauphysik der Universität Kassel, dem sog. "Klimahaus". Das Gebäude ist auf dem Universitätsgelände im innerstädtischen Bereich angesiedelt und weist eine Umbauung gem. Bild 4.1 auf.

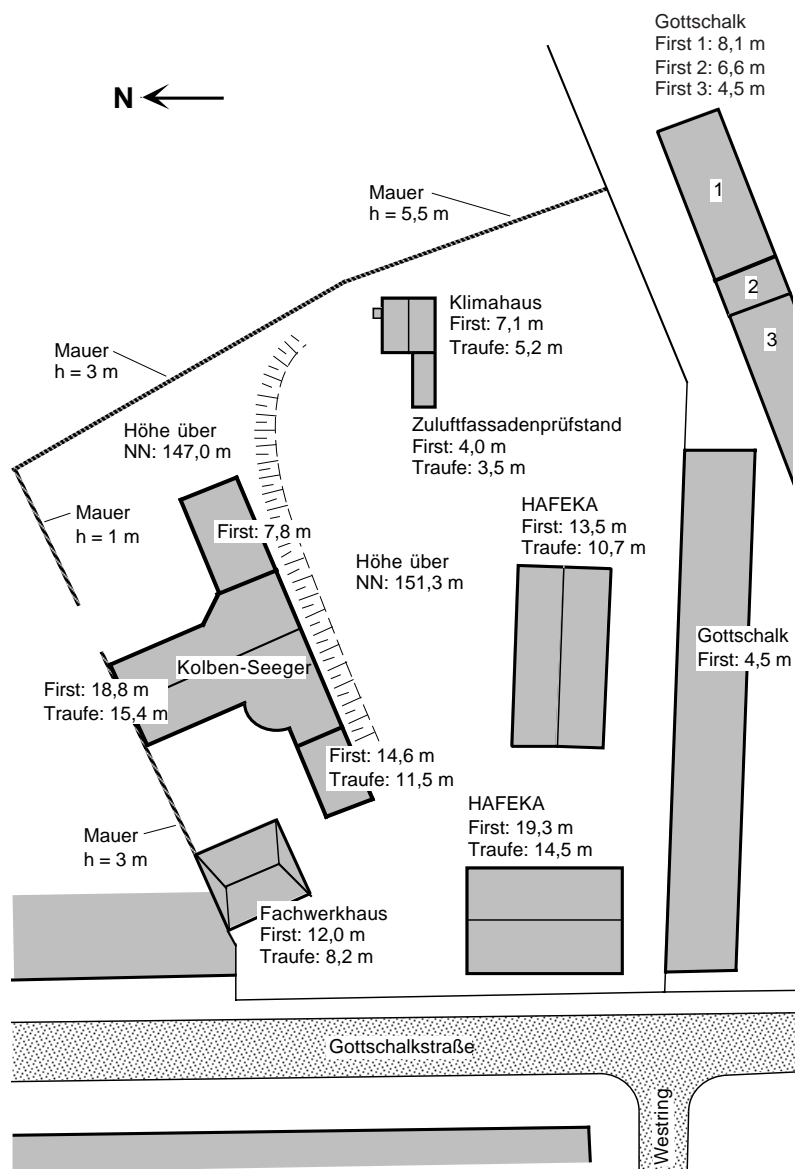


Bild 4.1: Schematischer Lageplan des Klimahauses mit Angabe der Höhen umliegender Gebäude.

Das Versuchsgebäude besteht im wesentlichen aus einem Prüfraum mit einem Volumen von  $58,5 \text{ m}^3$ , einem darunterliegenden Kellerraum und dem direkt über dem Prüfraum liegenden Kriechboden als Pufferräume, sowie einem Dachboden. Es ist exakt nach den Haupthimmelsrichtungen ausgerichtet. Zur Nord- und Westseite hin befindet sich zwischen Prüfraum- und Außenwand jeweils eine Pufferzone von etwa 1 m Breite. Weiterhin sind Vorrichtungen geschaffen, die es ermöglichen auch auf der Süd- und Ostseite des Gebäudes eine Pufferzone zu errichten. Das Luftvolumen des Prüfraumes entspricht bei allen durchgeführten Messungen der in Kapitel 3.1 definierten Meßzone.

Die Nord- und Westwand sowie Boden und Decke des Prüfraumes bestehen aus armiertem Beton, nach Süden und Osten wird der Raum von verputzten Porenbetonwänden begrenzt. Zur Südseite hin befindet sich ein Fenster mit einem Dreh- und einem Kippflügel. Es hat die Abmessungen  $1,33 \text{ m} \times 1,98 \text{ m}$  (Höhe  $\times$  Breite). Auf der gegenüberliegenden Seite ist eine Stahltür mit einer Öffnung von  $1,90 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$  eingelassen. Grundriß und Schnitt des Gebäudes sind im Anhang aufgeführt.

## 4.2 Luftwechselmeßsystem

Ausgehend von den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden der Tracergas-Meßverfahren umfaßt eine Versuchseinrichtung geeignete Komponenten zur Einbringung des Tracergases, zur Meßgasentnahme, zur Meßgasanalyse und zur Steuerung und Meßwerterfassung. Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Komponenten und komplette Meßsysteme wird in [Charlesworth] gegeben. Weitere Angaben zu Aufbau und Anwendung von Tracergas-Meßeinrichtungen werden in [Heidt] [Lobeck] [Alexander] [Rabenstein I] [Sherman I] [Schulze] gemacht. Die spezielle Anwendung der Konstant-Konzentrations-Methode im Hinblick auf die erforderliche Regelungstechnik wird u.a. in [Rabenstein II] [Sandberg] [Compagnon] [Axley] behandelt.

### 4.2.1 Beschreibung des Meßaufbaus

Der gesamte Meßaufbau ist innerhalb des Versuchsgebäudes auf den Dachboden, den eigentlichen Meß- oder Prüfraum und den als Laborraum eingerichteten Kellerraum verteilt.

Im Kellerraum ist der Infrarotabsorptions-Gasanalysator als 19"-Einschub in einem Schwenkgehäuse installiert. Er dient zur kontinuierlichen Messung von Distickstoffoxidkonzentrationen ( $\text{N}_2\text{O}$ ) im Bereich zwischen 0 und 100 ppm (erster Meßbereich) und zwischen 100 und 500 ppm (zweiter Meßbereich). Das Meßgas wird durch eine geräteinterne Meßgaspumpe angesaugt.

Jede der vier Meßgas-Ansaugleitungen kann an jeweils ein Magnetventil angeschlossen werden, und zwar so, daß in Ruhestellung der Ventile das angesaugte Meßgas über die Vorabsaugpumpe und eine gesonderte Kompensationsleitung in den Prüfraum zurückgepumpt wird. Erhält eines der Ventile einen Schaltimpuls, so wird das Meßgas von der an diesem Ventil angeschlossenen Meßstelle direkt in den Analysator geleitet, während das Gas von den anderen drei Meßstellen in den Prüfraum zurückgepumpt wird. Durch die Vorabsaugpumpe wird so erreicht, daß an den Ventilen ständig Meßgas von allen Meßstellen anliegt. Aufgrund der Länge der Schlauchleitung zwischen Meßstelle und Ventil von jeweils 11 Metern ergibt sich allerdings, daß das Meßgas gegenüber dem Zeitpunkt der Ventil-Umschaltung bereits um das Produkt aus Leitungsvolumen und dem Kehrwert des Meßgas-Volumenstroms älter ist, was aber vernachlässigt werden kann.

Dies gilt nicht für das vom Meßgas durchströmte Volumen "hinter" den Ventilen, also vor allem innerhalb des Gasanalysators (Leitungen, Filter, Pumpe, Meßküvette). Das Produkt aus diesem Volumen und dem Kehrwert des Meßgas-Volumenstroms ergibt die Zeit, die das nachströmende Meßgas nach der Umschaltung von einer Meßstelle auf eine andere benötigt, um das bisher im Analysator und insbesondere in der Meßküvette befindliche Gas zu verdrängen. Die Ansprechverzögerung des Gasanalysators, die max. 40 s beträgt, wird berücksichtigt, indem zwischen dem Zeitpunkt des Umschaltens auf eine andere Meßstelle und der Durchführung einer Distickstoffoxidkonzentrations-Messung, im Meßwerterfassungsprogramm eine Verzögerungszeit vorgesehen ist.

Für die Messungen mit der Konstant-Konzentrations-Methode sind die vier Meßgasleitungen direkt vor dem Analysator zusammengeführt und auf ein Magnetventil geschaltet. Es wird somit eine mittlere  $N_2O$ -Konzentration als Ist-Wert des Regelsystems und zur Bestimmung des Luftwechsels herangezogen.

Im Kellerraum befinden sich auch die Druckgasflasche mit dem Tracergas Distickstoffoxid sowie zwei weitere Druckgasflaschen mit Prüfgasen für die Nullpunkt- bzw. die Empfindlichkeitskalibrierung, die zur Durchführung von Kalibrierungsprozeduren an einen Meßgaseingang anzuschließen sind. Alle drei Druckgasflaschen sind neben dem obligatorischen Absperrventil mit Flaschendruckminderern ausgestattet, wobei für das Tracergas ein zweistufiger Druckminderer mit besonders hoher Regelgenauigkeit vorgesehen ist. Zusätzlich wird ein Feindosierventil eingesetzt, um eine möglichst hohe Dosiergenauigkeit und Konstanz des Tracergasvolumenstromes zu erreichen. Ein über das Meßprogramm ansteuerbares Magnetventil öffnet oder schließt die Tracergaszufuhr, die über einen Massenstrom-Regler gemessen wird.

Das Distickstoffoxid wird über einen PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 4 mm in den Prüfraum geleitet. Außerdem wird das über die Vorabsaugpumpe dem Prüfraum entzogene sowie das durch den Analysator strömende Gas über zwei PVC-Schlauchleitungen mit einem Innendurchmesser von 6 mm wieder zurückgeführt, um den Meßgasverlust zu kompensieren. Durch die zeitliche Differenz zwischen den Zeitpunkten des Absaugens des Meßgases aus dem Prüfraum und dem Wiedereintritt entsteht wegen der relativ geringen Volumenströme nur ein vernachlässigbar kleiner Fehler.

Im Prüfraum kann das Distickstoffoxid und das rückgeführte Meßgas mittels eines selbsttätig schwenkenden Tischventilators künstlich mit der Raumluft bzw. dem im Prüfraum befindlichen Meßgas verwirbelt werden. Die Anordnung dieser Tracergas-Eintrittsstelle im Prüfraum ist variierbar. Dies gilt auch für die Meßgasansaugstellen, die jeweils an beweglichen Stativen angeordnet sind.

Eine Meßstelle für die Aufnahme der Innenraumtemperatur befindet sich etwa in Raummitte, wobei der Pt-100 - Meßfühler gegenüber Wärmestrahlung durch einen mit Aluminium umhüllten Kunststoffbecher weitgehend abgeschirmt ist.

Über eine im Dachboden installierte Lüftungsanlage, welche im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausschließlich für Referenzmessungen eingesetzt wird, können Zu- bzw. Außenluftstraten bis zu  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  vorgegeben werden. Die Ab- bzw. Fortluft wird über das Dach abgeführt. Ein im Dachboden aufgestellter Radialventilator saugt die Außenluft an und fördert sie über die Zuluftführung von insgesamt etwa 7 Metern Länge in den Prüfraum. Ein in die Zuluftführung integriertes Flügelradanemometer dient zur Ermittlung des Zuluftvolumenstroms.

Das Dreh- und Kippflügel Fenster ist in der nach Süden gerichteten Außenwand des Prüfraumes angeordnet. Beide Flügel sind mit einem vollautomatischen Öffnungs- und Schließmechanismus versehen.

Um das Fenster herum sind 8 Druckmeßstellen angeordnet, die zur Erfassung der Druckdifferenz zwischen dem Meßraum und dem Staudruck auf der Fassade über einen Meßstellenumschalter auf eine Differenzdruck-Meßdose geschaltet sind.

Zur Beheizung der Meßraumes wird ein elektrisch betriebener Ölradiator verwendet, der rollbar ist und somit beliebig im Raum angeordnet werden kann.

Die Meßdatenerfassung, die Steuerung der Fensterstellungen und die Regelung der Konzentration und der mechanischen Lüftungsanlage werden mit dem Programm LabVIEW der Firma National Instruments realisiert, mit welchem auch die Erfassung der meteorologischen Meßdaten erfolgt. Als PC wird ein AT-386-

Rechner mit 8 MByte RAM-Speicher eingesetzt. Der Rechner ist mit einer 16 Bit-Analog I/O-Karte der Firma National Instruments ausgestattet. Die Karte besitzt 8 analoge Eingänge und zwei analoge Ausgänge. Die Ansteuerung der insgesamt 32 Relais wird zum Teil von der AT-MIO-16X-Karte und zum Teil von der Digital I/O-Karte übernommen. Jedes Relais kann mit 6 A bei 30 VDC oder 250 VAC belastet werden, oder mit einer Leistung von 170 W bzw. 1800 VA.

Das Programm zur Erfassung der Meßgrößen und Regelung der Tracergaskonzentration für die Konstant-Konzentrations-Methode erzeugt Tagesdateien, in denen Gaskonzentration und -zufuhr, Raumlufttemperatur und Differenzdrücke in 20 s-Intervallen gespeichert werden. Die Messung und Regelung der Konzentration erfolgt in 5 s-Abständen. Die Druckmeßstellen werden alle 5 s umgeschaltet. Temperatur und Differenzdrücke werden als Einzelwerte, Tracergaskonzentration und -zufuhr als Mittelwerte in dem Intervall abgelegt.

Detaillierte Angaben zum Meßprogramm, zu den verwendeten Hardwarekomponenten sowie weiteren Programmen zur Kalibration des Meßsystems und Luftwechselformung bei Einsatz der Lüftungsanlage sind in [Oppermann] zu finden.

Bild 4.2 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsraumes und der Meßeinrichtung.

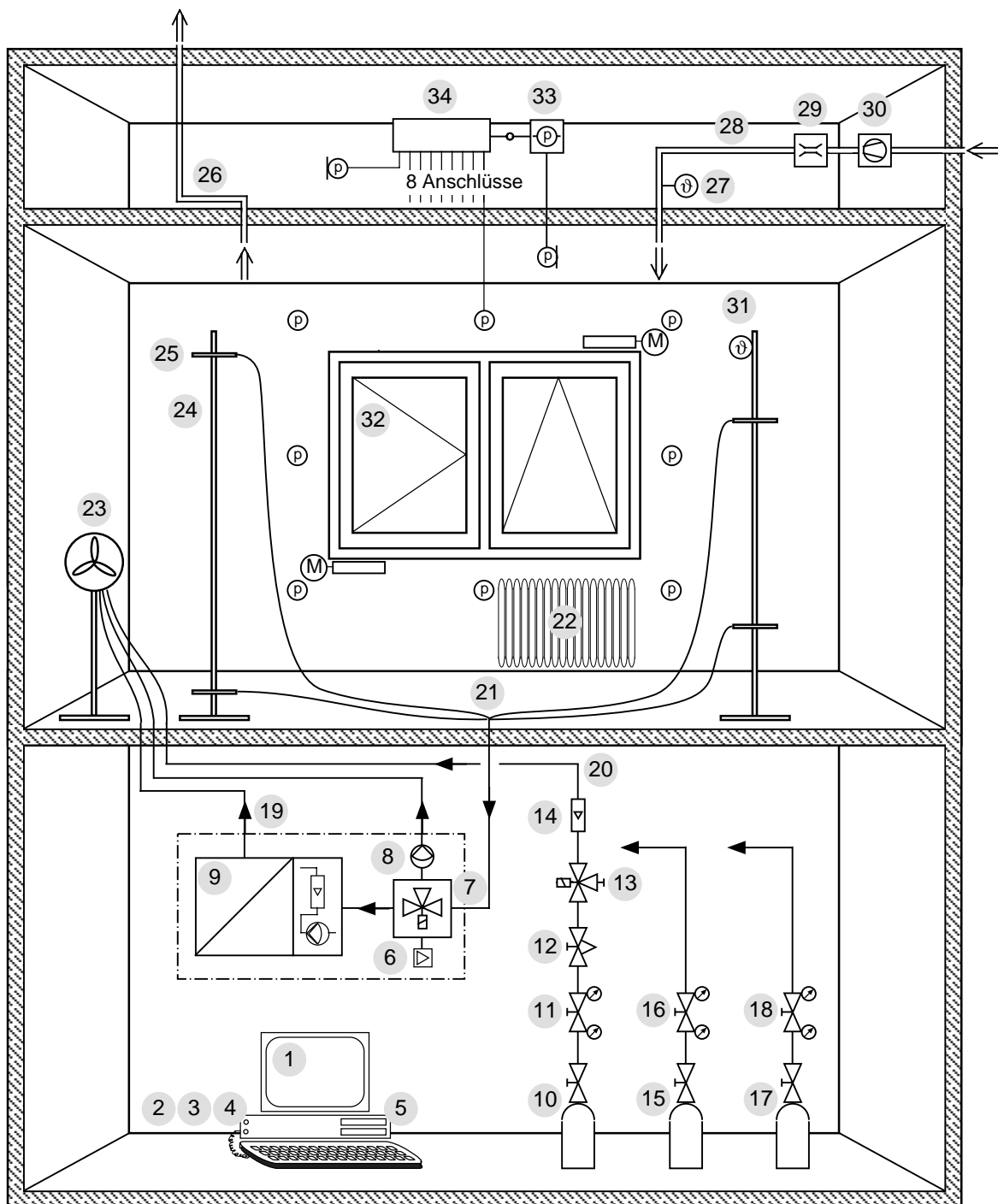


Bild 4.2: Schematischer Aufbau des Versuchsraums und der Meßeinrichtung.

Tabelle 4.1: Meßaufbau - Liste der Komponenten

- |    |  |    |  |
|----|--|----|--|
| 1  | IBM-AT-kompatibler PC  | 18 | Flaschendruckminderer; zweistufig, 300/2.5 bar; Typ MESSER GRIESHEIM Constant ZW, N 1-1,5                                  |
| 2  | Analog I/O-Karte im PC, Typ: National Instruments, AT-MIO-16X  | 19 | Meßgas-Rückführungen aus dem Analysator und von der Vorabsaugpumpe in den Meßraum  |
| 3  | Digital I/O-Karte im PC, Typ: National Instruments, PC-DIO-24  | 20 | Distickstoffoxid-Einleitung in den Meßraum   |
| 4  | 4 Relaiskarten, Typ: National Instruments, SC 2062   | 21 | Meßgas-Ansaugleitungen   |
| 5  | Drehzahlsteller für Zuluftventilator   | 22 | Elektro-Ölradiator, 2 kW   |
| 6  | Magnetventil-Verstärker  | 23 | Tischventilator zur Verwirbelung des Tracergases mit der Raumluft; automatisch schwenkend, Schwenkwinkel ca. 85°, ø 250 mm |
| 7  | Meßstellenumschalter mit Magnetventilen; Anschlußmöglichkeit für vier Meßstellen   | 24 | Stative zur Positionierung der Konzentrations-Meßstellen im Raum   |
| 8  | Meßgas-Vorabsaugpumpe  | 25 | Meßgas-Ansaugtrichter  |
| 9  | Distickstoffoxid-Gasanalysator mit interner Meßgaspumpe und Durchflußanzeige; Typ: MAIHAK UNOR 6N  | 26 | Abluftkanal  |
| 10 | Druckgasflasche mit Absperrventil; Distickstoff 2.0 (Tracergas)  | 27 | Zulufttemperaturfühler (PT 100)  |
| 11 | Zweistufiger Flaschendruckminderer mit hoher Regelgenauigkeit; Typ: ALPHAGAZ HBS 300/1, 300/1.5 bar  | 28 | Zuluftkanal  |
| 12 | Feindosierventil, Typ: ALPHAGAZ Milli-Mite   | 29 | Flügelradanemometer zur Zuluft-Volumenstrommessung; Typ: LAMBRECHT Nr. 1468 (20/4)   |
| 13 | 2/2-Wege-Magnetventil zum Absperrn der Tracergaszufuhr; Typ: Bürkert 124   | 30 | Zuluft-Radialventilator; Typ: AIRFLOW ELG 64   |
| 14 | Massenstromregler für Distickstoffoxid, Typ: Brooks 5850 E, 0-300 ml/min   | 31 | Innenraumtemperatur-Meßstelle (PT 100)   |
| 15 | Druckgasflasche mit Absperrventil; Prüfgasgemisch Stickstoff 5.0 und Distickstoffoxid 2.0 (90.4 ± 2 ppm) zur Empfindlichkeits-Kalibrierung | 32 | Dreh-und Kippflügel-Fenster; Breite: 1,98 m, Höhe: 1.33 m  |
| 16 | Flaschendruckminderer; zweistufig, 300/2.5 bar; Typ: MESSER GRIESHEIM Constant ZW, H 1-1.5   | 33 | Drucksensor, Typ: Dresser XLDP, ± 60 Pa, 0,25%   |
| 17 | Druckgasflasche mit Absperrventil; Prüfgas Stickstoff 5.0 zur Nullpunkt-Kalibrierung   | 34 | 10 Magnetventile zur Umschaltung der Druckmeßstellen   |

### 4.2.2 Regelungssystem

Die Durchführung von Tracergas-Messungen mit der Konstant-Konzentrations-Methode erfordert den Einsatz einer Regeleinrichtung, um die in 3.4.4 beschriebene Vorgehensweise bei dieser Meßmethode zu ermöglichen. Basierend auf den in 4.2.1 genannten Komponenten des Versuchsaufbaus, wird zunächst ein einfaches Modell des Regelkreises aufgestellt (Bild 4.3).

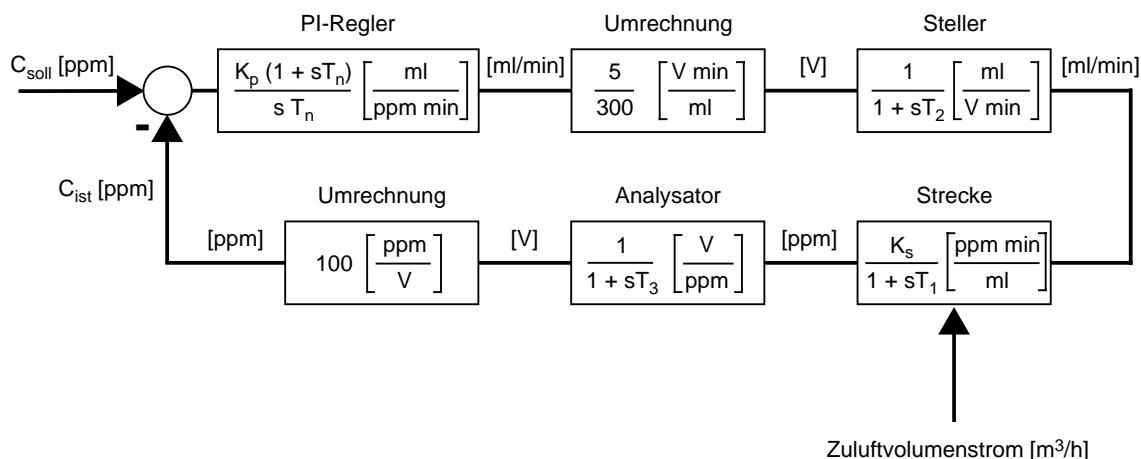


Bild 4.3: Modell des Tracergas-Konzentrations-Regelkreises.

Die Regelung erfolgt über einen Software-PID-Regler nach [Latzel]. In [Oppermann] ist die programmtechnische Umsetzung der Regelalgorithmen näher erläutert. Die Zeitkonstante des Stellers beträgt nach Angaben des Herstellers  $T_2 = 2$  s. Innerhalb dieser Zeit ist der Istwert mit  $\pm 2\%$  auf den Sollwert eingeregelt. Die Zeitkonstante des Analysator ist  $T_3 = 40$  s. Diese Zeit benötigt der Analysator um bei einem Konzentrationssprung von 0 auf 100 ppm den Endwert zu erreichen. Evtl. auftretende Totzeiten durch die Länge der Gasschläuche brauchen nicht berücksichtigt zu werden, da der Gasanalysator, wie bereits genannt, eine Vorabsaugepumpe besitzt, so daß das Meßgas immer direkt am Analysator anliegt und über die Magnetventile auf das Spektrometer geschaltet werden kann.

Über die eigentliche Regelstrecke liegen keine zeitlichen Angaben vor. Unter der Strecke ist das Einblasen des Tracergases in den Raum, die Verteilung und gleichmäßige Vermischung mit der Raumluft durch einen Zimmerventilator, die Rückführung des Tracergases zum Analysator und der Raum an sich zu verstehen. Um die Strecke geeignet modellieren zu können und um die Zeitkonstanten zu bestimmen, werden bei definierten Störgrößen verschiedene Sprungantwort-



ten aufgenommen. Auf den Steller wird ein Sprung von 0 auf 5 V gegeben, der somit die Strecke mit einem Sprung von 0 auf 300 ml/min Tracergaseintrag beaufschlagt. Es ergeben sich zeitliche Verläufe des Zuluftvolumenstroms und der Tracergaskonzentration wie in Bild 4.4 exemplarisch dargestellt.

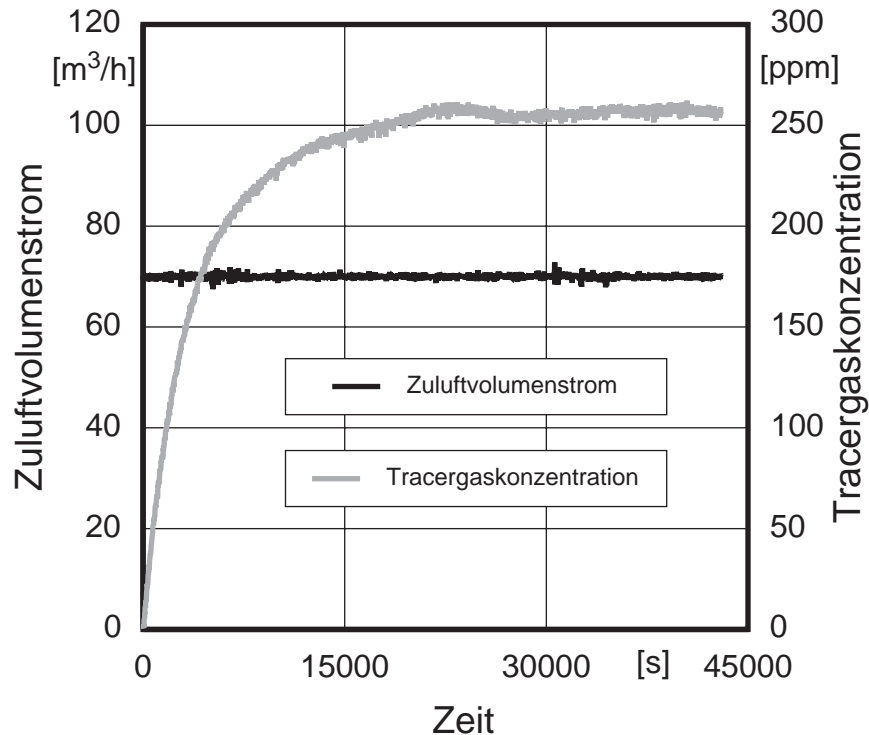


Bild 4.4: Sprungantwort des Konzentrations-Regelkreises bei einem Zuluftvolumenstrom von  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Die Auswertung der Sprungantworten erfolgen nach dem in [Sponer] beschriebenen Verfahren. Für die charakteristischen Kenngrößen der in Bild 4.4 aufgeführten Sprungantwort ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 C(\infty) &= 257,14 \text{ ppm}; & 0,7 C(\infty) &= 180 \text{ ppm}; \\
 t_{70} &= 4500 \text{ s}; & t_{70}/4 &= 1125 \text{ s}; & C(t_{70}/4) &= 70 \text{ ppm}.
 \end{aligned}$$

Damit folgt für das charakteristische Verhältnis  $C(t_{70}/4) / C(\infty) = 0,272$ . Es handelt sich somit um ein  $PT_1$ -Glied. Die nach [Sponer] ermittelte Zeitkonstante und die Streckenverstärkung ergeben sich zu  $T_1 = 3750 \text{ s}$  und  $K_s = 0,875 \text{ ppm min/ml}$ . Für die Dimensionierung des Reglers ist nur diese Zeitkonstante maßgebend, da die beiden anderen bekannten Zeitkonstanten  $T_2$  und  $T_3$  im Verhältnis zu  $T_1$  sehr klein sind. Da die Möglichkeit besteht, die Störgröße bei der Aufnahme der Sprungantwort zu variieren, werden bei verschiedenen Zuluftvolumenströmen Sprungantworten aufgenommen. Ergebnis dieser Untersuchung ist, daß das Zeitverhalten und die Verstärkung der Strecke von der Störgröße abhängig ist.

Je größer der Luftwechsel ist, desto kleiner wird die Zeitkonstante und die Verstärkung der Strecke. Die Zeitkonstante  $T_2$  und die Verstärkung  $K_s$  variieren wie folgt:

von $T_2 = 2500$ s	bei $\dot{V}_{zu} = 90$ m <sup>3</sup> /h
bis $T_2 = 4420$ s	bei $\dot{V}_{zu} = 50$ m <sup>3</sup> /h
von $K_s = 0,71$ ppm min / ml	bei $\dot{V}_{zu} = 90$ m <sup>3</sup> /h
bis $K_s = 1,21$ ppm min / ml	bei $\dot{V}_{zu} = 50$ m <sup>3</sup> /h

Da bei den meßtechnischen Untersuchungen der Fensterlüftung Volumenströme  $< 50$  m<sup>3</sup>/h auftreten können und der Regler so dimensioniert werden sollte, daß immer die größte Zeitkonstante kompensiert wird, erfolgt die Festlegung  $T_n = 5000$  s. Die Sprungantwort für einen Zuluftvolumenstrom von 36 m<sup>3</sup>/h kann nicht aufgenommen werden, da der Meßbereichsendwert des Gasanalysators sonst überschritten würde. Kann davon ausgegangen werden, daß der Zuluftvolumenstrom nicht diese kleinen Werte erreicht, empfiehlt es sich, die Zeitkonstante zu verringern, um ein besseres Regelverhalten zu erzielen.

Die Verstärkung des Regelkreises wird empirisch durch die Aufnahme von Führungs- und Störsprüngen bestimmt. Die Bilder 4.5 und 4.6 zeigen das Führungs- und Störverhalten des Regelkreises bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf 50 m<sup>3</sup>/h nach einer Zeit von 4 Stunden. Der Sollwert der Tracergaskonzentration ist dabei mit 40 ppm vorgegeben.

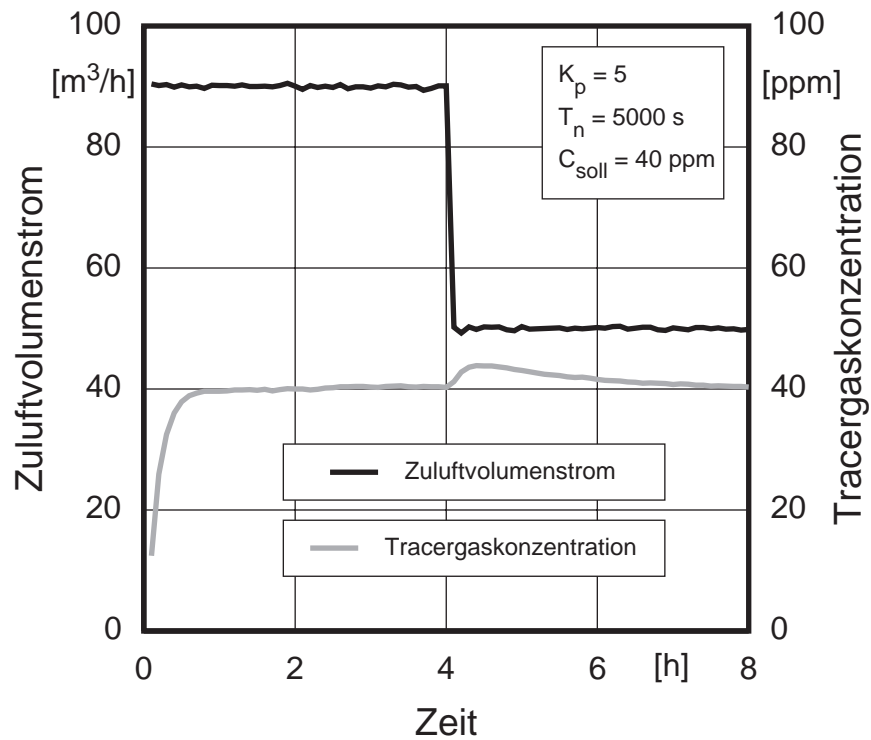


Bild 4.5: Führungs- und Störverhalten mit  $K_p = 5$  und  $T_n = 5000$  s bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf 50  $\text{m}^3/\text{h}$ .

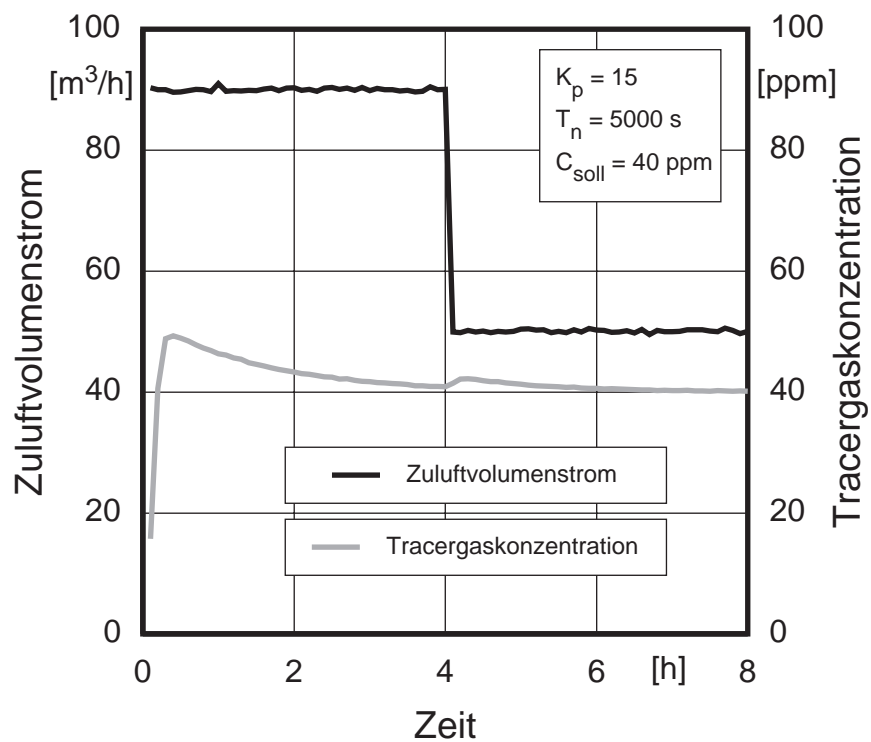


Bild 4.6: Führungs- und Störverhalten mit  $K_p = 15$  und  $T_n = 5000$  s bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf 50  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Aus den dargestellten Verläufen der Tracergaskonzentration ist zu erkennen, daß das Störverhalten bei größerer Reglerverstärkung besser wird. Das Führungsverhalten hingegen verschlechtert sich, wobei das Überschwingen bei  $K_p = 15$  nicht charakteristisch ist, da das Stellglied bei dieser Verstärkung bereits an die obere Begrenzung gelangt. Die Verstärkung des Reglers darf nicht zu groß gewählt werden, da einerseits der Stellwert (Tracergaszufuhr) zu starke Schwankungen aufweist und andererseits das schlechte Führungsverhalten eine lange Anlaufzeit der Messung bedeuten kann. Als Wert für die Verstärkung wird deshalb  $K_p = 10$  gewählt. Diese Vorgehensweise der empirischen Reglereinstellung hat sich bei den durchgeführten Messungen sehr gut bewährt.

### 4.3 Meteorologiestation

Zur Erfassung von meteorologischen Daten ist bei dem beschriebenen Versuchsgebäude eine Meteorologiestation errichtet. Es werden insgesamt 18 Meßgrößen in 1/10 Stundenschritten aufgezeichnet und in Tagesdateien abgelegt. Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Meßgrößen und deren Genauigkeit.

Tabelle 4.2: Relevante Meßgrößen der Meteorologiestation und deren Genauigkeit.

Meßgröße	Meßbereich	relative Genauigkeit	Ausgangssignal
Windrichtung	0 - 360°	0,2 %	0 - 400 mV
Windgeschwindigkeit	0,5 - 35 m/s	0,3 %	0 - 1,861 V
Luftdruck	900 - 1050 hPa	0,3 %	0 - 10 V
Lufttemperatur	-20 bis +80 °C	0,5 %	0 - 5 V
relative Luftfeuchte	0 - 100 % r.F.	3 %	0 - 5 V

Die Messung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit erfolgt mit einem kombinierten Windgeber. Dieser ist auf einem Mast in 13 m Höhe über dem Erdboden (entspr. 7 m über Firsthöhe) direkt an dem Versuchsgebäude angebracht. In der Meßdatei werden sowohl die skalare als auch die vektorielle Windgeschwindigkeit abgelegt. Die Größen werden in dem 1/10 Stundenschritt über 20 s - Intervalle gemittelt. Nach Durchlauf von 10 Intervallen erfolgt eine weitere Mittelwertbildung.

Lufttemperatur und relative Luftfeuchte werden von Sensoren erfaßt, die sich in einer Schutzhütte befinden. Sie ist auf der Nordseite des Gebäudes in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden angebracht. Als Luftdruckgeber wird ein elektronisches Barometer verwendet, welches im Keller des Versuchsgebäudes angebracht ist.

Lufttemperatur, -feuchte und -druck werden als Mittelwerte aus 10 Einzelmessungen gespeichert.

Im Anhang ist eine Darstellung der Meteorologiestation aufgeführt. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Meßgeräten und dem Meßprogramm sind in [Oppermann] zu finden.

## 5. Versuchsdurchführung

Die Luftwechsellmessungen fanden in dem Zeitraum September 1994 bis April 1995 in dem in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsgebäude unter natürlichen meteorologischen Randbedingungen statt. Es wurde der Einfluß der Öffnungsweite des Dreh- und Kippflügelfensters und der Einbausituation des Fensters in der Laibung untersucht. Weiterhin wurden Untersuchungen hinsichtlich der Anwendbarkeit von Tracergasmessungen zur Ermittlung des Luftwechsel angestellt.

### 5.1 Meteorologische Randbedingungen

Als maßgebliche meteorologische Einflußfaktoren auf den natürlichen Luftwechsel werden, wie auch schon in Kapitel 2 genannt, die Windgeschwindigkeit und -richtung und die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur betrachtet. Die Häufigkeitsverteilungen dieser Meßgrößen sind in den Bildern 5.1 bis 5.4 für den Untersuchungszeitraum angegeben.

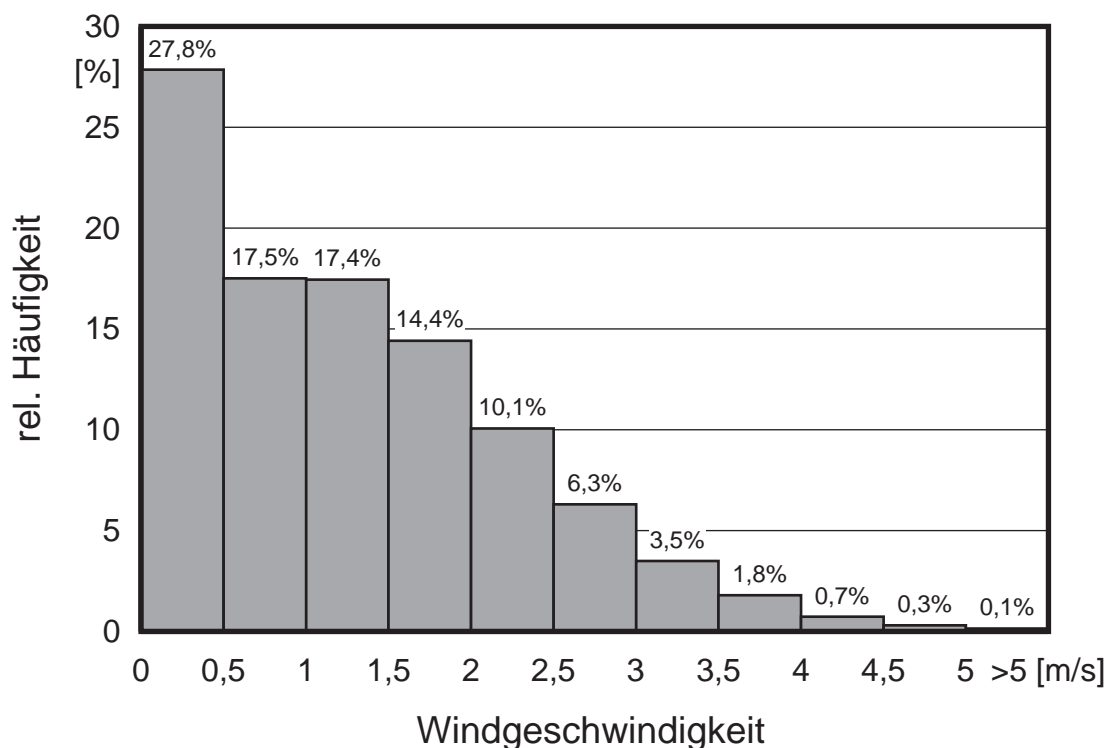


Bild 5.1: Rel. Häufigkeit der vektoriellen Windgeschwindigkeit  $u_v$  im Untersuchungszeitraum.

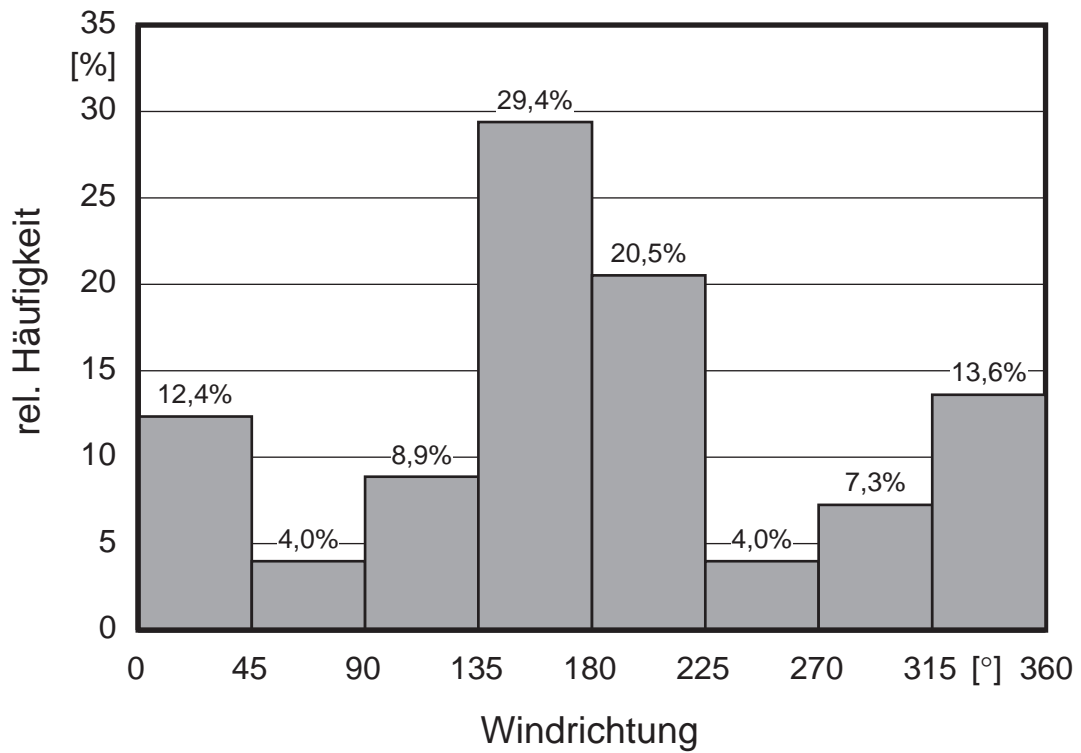


Bild 5.2: Rel. Häufigkeit der Windrichtung  $\alpha$  im Untersuchungszeitraum ( $\alpha = 0^\circ$  entspricht Nord,  $\alpha = 90^\circ$  entspricht Ost).

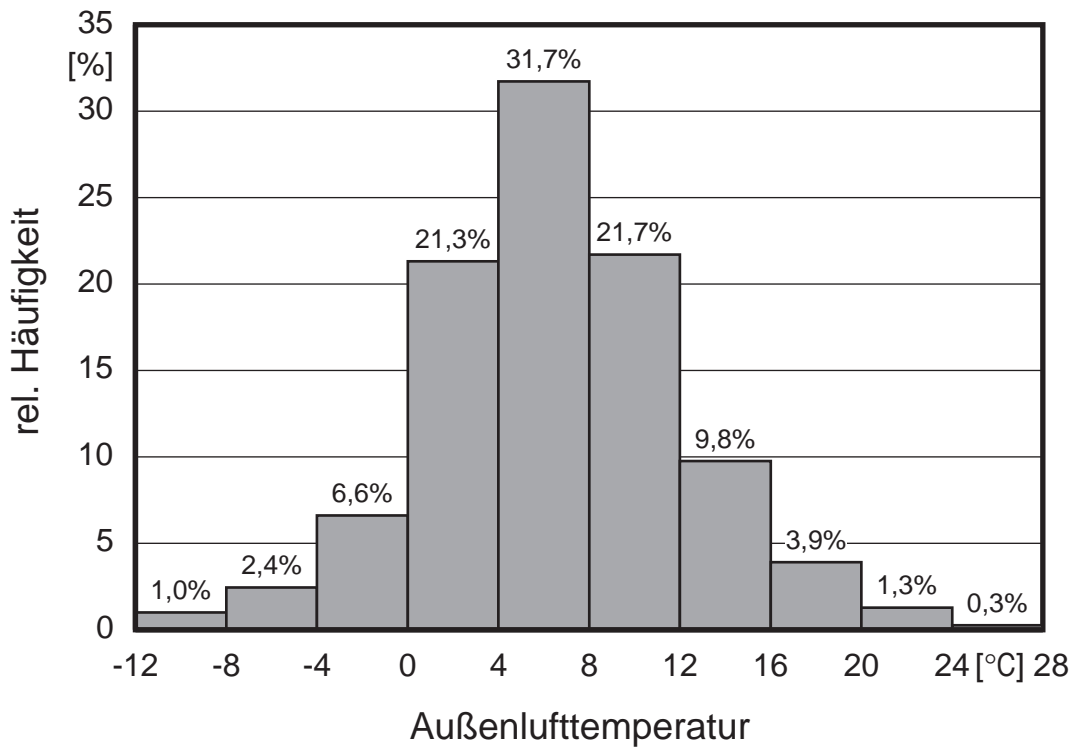


Bild 5.3: Rel. Häufigkeit der Außenlufttemperatur  $\vartheta_a$  im Untersuchungszeitraum.

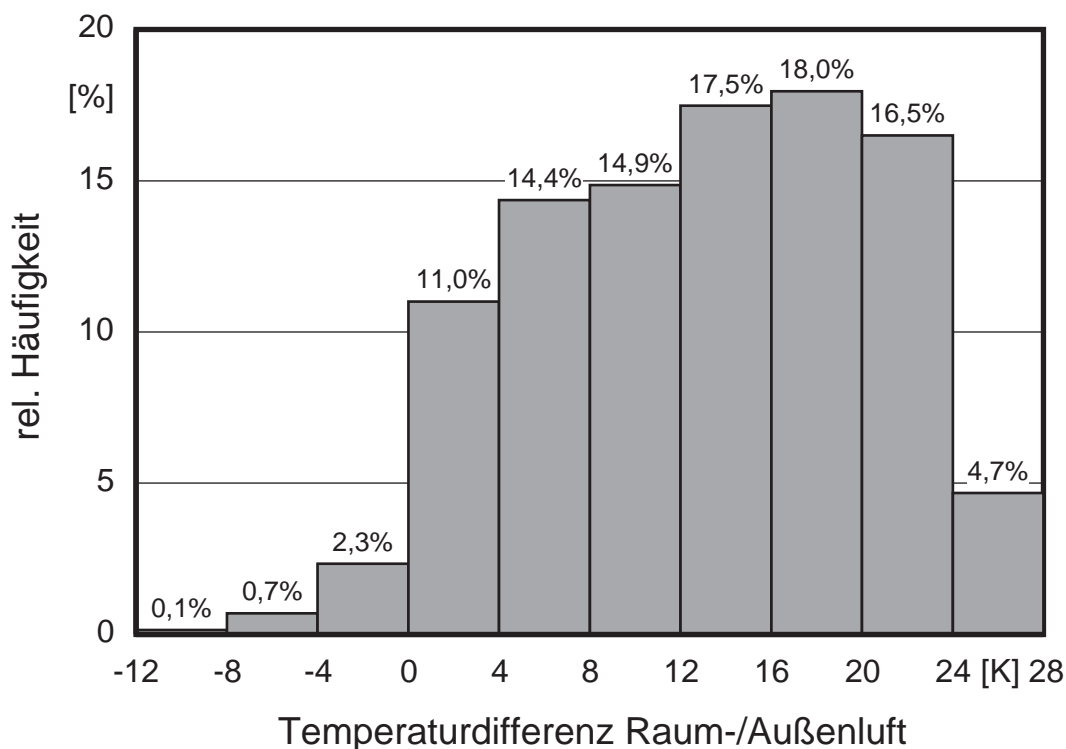


Bild 5.4: Rel. Häufigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur  $\vartheta_i - \vartheta_a$  im Untersuchungszeitraum.

## 5.2 Auswahl der Meßvariationen

Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Öffnungsstellungen des Dreh- und Kippflügels. Bei dem Drehflügel werden Öffnungswinkel von  $\alpha = 3,5^\circ$  bis  $90^\circ$  und bei dem Kippflügel von  $\alpha = 1,02^\circ$  bis  $7,17^\circ$  betrachtet. Eine Übersicht über die zugrunde gelegten Varianten gibt Tabelle 5.1. Die Definition der jeweiligen Öffnungsweiten ist in Bild 5.5 dargestellt.

Das Fenster ist bündig an der Innenseite der Laibung angeordnet. Um den Einfluß einer tiefer in der Laibung angeordneten Einbausituation zu untersuchen, wird oberhalb und seitlich des Kippflügels ein Holzrahmen mit einer Tiefe von 20 cm in einem Abstand von 2 cm angebracht. Die Anordnung ist in Bild 5.6 schematisch dargestellt.



Tabelle 5.1: Variation der Öffnungsweiten des Kipp- und Drehfensters.

Kippfenster		Drehfenster	
Öffnungsweite $s$	Öffnungswinkel $\alpha$	Öffnungsweite $s$	Öffnungswinkel $\alpha$
2 cm	1,02°	5 cm	3,49°
4 cm	2,05°	10 cm	6,99°
6 cm	3,07°	15 cm	10,5°
8 cm	4,09°	-	45°
10 cm	5,12°	-	90°
12 cm	6,14°		
14 cm	7,17°		

Kippfenster (Vertikalschnitt) bzw. Drehfenster (Horizontalschnitt)

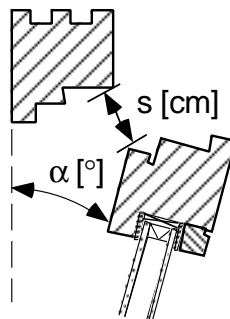


Bild 5.5: Definition der Öffnungsweiten bzw. -winkel am Kipp- und Drehfenster.

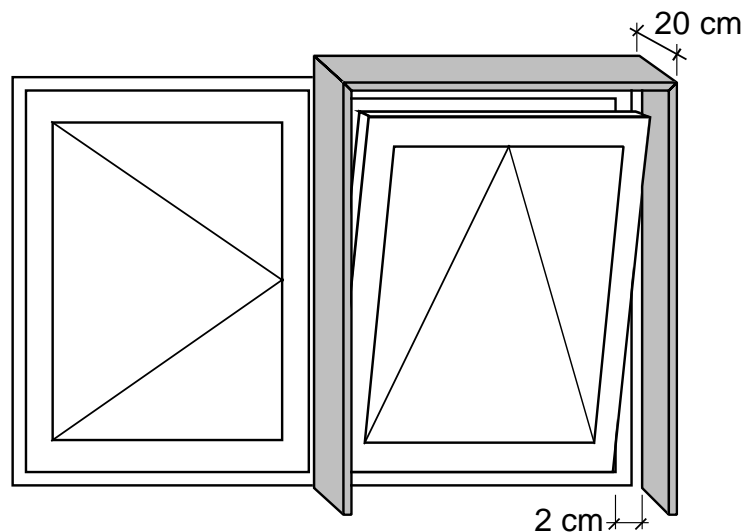


Bild 5.6: Schematische Darstellung der Anordnung des Rahmens am Kippflügel.

### 5.3 Referenzmessungen

Der Einsatz der Tracergasmeßtechnik zur Bestimmung des Luftwechsels basiert auf der Gültigkeit der in Kap. 3 getroffenen Aussagen zur Modellbildung, zu den prinzipiellen Voraussetzungen und zum Auswerteverfahren. Weiterhin ist die Auswahl der geeigneten Komponenten des Versuchsaufbaus und die sorgfältige Durchführung der Messungen von entscheidender Bedeutung.

Die auf der Bilanzierung der Tracergas-Massenströme basierende Modellbildung in Kap. 3 berücksichtigt eine mögliche Tracergaskonzentration in der Außenluft. In [Roulet III] wird die Umgebungskonzentration von  $N_2O$  mit 0,32 ppm angegeben. Zur Überprüfung dieser Aussage werden über den Untersuchungszeitraum verteilt Messungen der Außenluftkonzentration durchgeführt, und es ergeben sich Werte zwischen 0,3 und 0,8 ppm. Vereinfachend wird für die Auswertung der Meßergebnisse gem. Gleichung 3.12 im weiteren ein Mittelwert von 0,5 ppm herangezogen.

Die Validität des Meßverfahrens wird anhand einer Vergleichsmessung mit der mechanischen Lüftungsanlage durchgeführt. Der über die Lüftungsanlage zugeführte Luftvolumenstrom wird mittels eines an einer Blendenmeßstrecke kalibrierten Flügelradanemometers gemessen und in unterschiedlichen Bereichen variiert. Als Beispiel ist in Bild 5.7 der zeitliche Verlauf des Zuluftvolumenstroms, ermittelt über die Flügelradmessung und die Tracergasmessung mit der Auswer-

tung gem. Gleichung 3.12, dargestellt. Weitere umfangreiche Untersuchungen an dem betrachteten Versuchsaufbau sind in [Behr] [Volkman] [Oppermann] dokumentiert. Hieraus lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Modellbildung und das abgeleitete Auswerteverfahren repräsentieren die tatsächlichen Verhältnisse.
- Das Störverhalten des Regelungssystems ist ausreichend stabil.
- Der Einfluß von Sorptionsvorgängen des  $N_2O$  an den Raumumschließungsflächen macht sich bei den Messungen nicht bemerkbar, was darauf hindeutet, daß der Sorptionsanteil in geringen Größenordnungen liegt. Denkbar ist allerdings auch ein Sättigungseffekt, da die Messungen kontinuierlich durchgeführt werden [Raatschen, pers. Mitteilung 21.04.95].
- Der Raumventilator erzeugt eine ausreichende Durchmischung der Raumluft mit dem Tracergas.

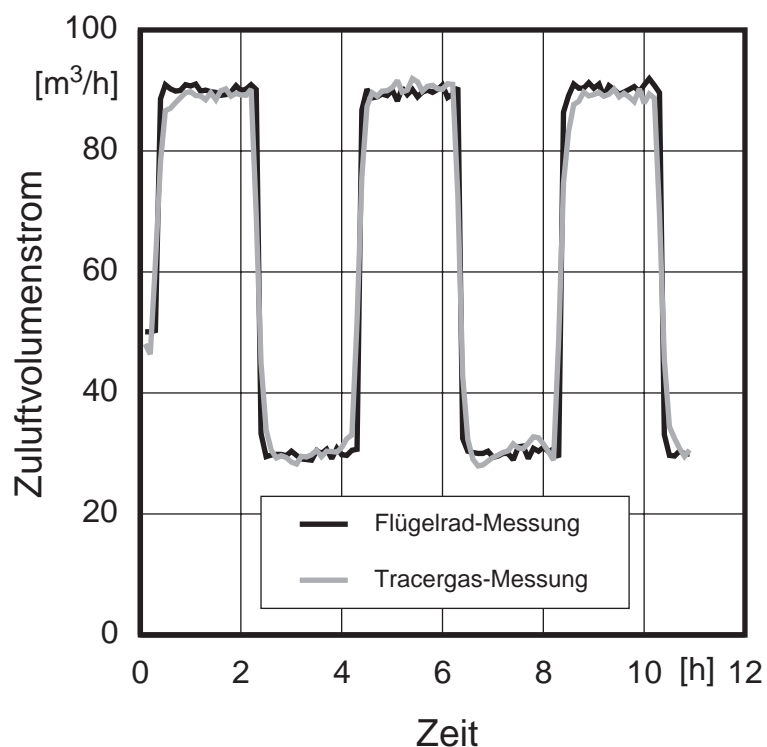


Bild 5.7: Darstellung der Zuluftvolumenströme über die Lüftungsanlage zum Vergleich zwischen Flügelrad- und Tracergas-Messung.

Eine weitere Überprüfung hinsichtlich der Anwendbarkeit der Meß- und Auswerteverfahren wird anhand einer exemplarischen Messung bei geöffnetem Kippfenster mit 6 cm Weite und dem wie in Bild 5.6 angebrachten Rahmen durchgeführt.

In zwei direkt aufeinanderfolgenden Meßreihen wird der Zuluftvolumenstrom einmal mittels der Konstant-Konzentrations-Methode und einmal mit der Konzentrationsabfall-Methode bestimmt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgen die Messungen unter annähernd gleichen meteorologischen Randbedingungen, d.h. die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft ist näherungsweise konstant, und die Windgeschwindigkeit ist mit Werten unter 0,5 m/s vernachlässigbar klein. In Bild 5.8 ist der zeitliche Verlauf der Tracergaskonzentration, der resultierenden Zuluftvolumenströme sowie der Raum- und Außenlufttemperatur für die beiden Messungen dargestellt. Es zeigt sich ein sehr stabiles Regelverhalten im linken Bereich des oberen Bildes, was auf die nur geringen Störgrößenänderungen zurückzuführen ist. Es treten lediglich Schwankungen in der Raumlufttemperatur auf, welche durch die 2-Punkt-geregelte Heizung hervorgerufen werden. Diese führen wiederum zu leichten Änderungen des Zuluftvolumenstroms.

Im Bereich der Konzentrationsabfall-Messung fällt die Tracergaskonzentration exponentiell von 100 auf 37 ppm. Der Luftaustausch nimmt leicht ab, da im zeitlichen Verlauf dieser Messung die Temperaturdifferenz innen/außen etwas kleiner wird. Der zugrunde gelegte Auswertezeitraum  $\Delta t$  in den Gleichungen 3.12 und 3.16 beträgt jeweils 0,1 h.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß sich beide Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels eignen und zu gleichen Ergebnissen führen. Die Konstant-Konzentrations-Methode hat dabei den Vorteil, daß sie zur kontinuierlichen Erfassung geeignet ist.

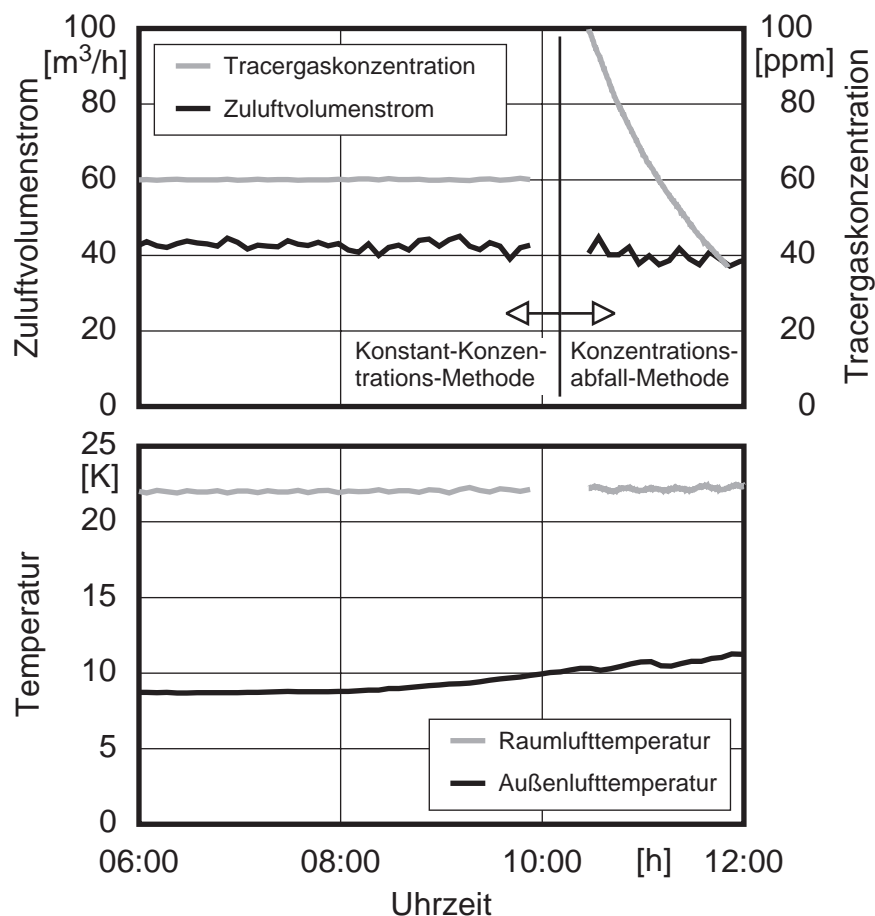


Bild 5.8: Vergleich der Meßmethoden Konstant-Konzentration und Konzentrationsabfall. Kippfenster 6 cm geöffnet, mit Rahmen gem. Bild 5.6. Messungen am 8.11.1994.

#### 5.4 Luftwechsel bei geschlossenem Fenster

Vor Beginn der meßtechnischen Untersuchung wird der Prüfraum abgedichtet, d.h. alle Kabel- und Schlauchdurchführungen werden verschlossen und die Tür wird mit einer umlaufenden Dichtung versehen. Eine Differenzdruckmessung mit der eingebauten Lüftungsanlage ergibt bei geschlossenem Fenster und einem Überdruck im Raum einen  $n_{50}$ -Wert von  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Zur Quantifizierung des Luftwechsels werden zwei Meßreihen mit der Konzentrationsabfall-Methode durchgeführt, deren Ergebnisse und Randbedingungen in Bild 5.9 dargestellt sind. Während der ersten Messung liegt eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft vor, die Windgeschwindigkeit beträgt zwischen 0 und  $2,6 \text{ m/s}$ . Die Auswertung des Konzentrationsabfalls ergibt einen Luftwechsel von  $n = 0,045 \text{ h}^{-1}$ , welcher einem Zuluftvolumenstrom von  $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$  entspricht. Die zweite Messung, bei der die Temperaturdifferenz geringer ist, allerdings eine durchschnittlich höhere Windgeschwindigkeit herrscht, führt zu  $n = 0,054 \text{ h}^{-1}$  entspre-

chend einem Volumenstrom von  $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Temperatur- und Windverhältnisse repräsentieren die extremsten Randbedingungen der gesamten Meßperiode. Die angegebenen Zuluftvolumenströme stellen somit den größten Offset für die im weiteren aufgeführten Meßergebnisse dar.

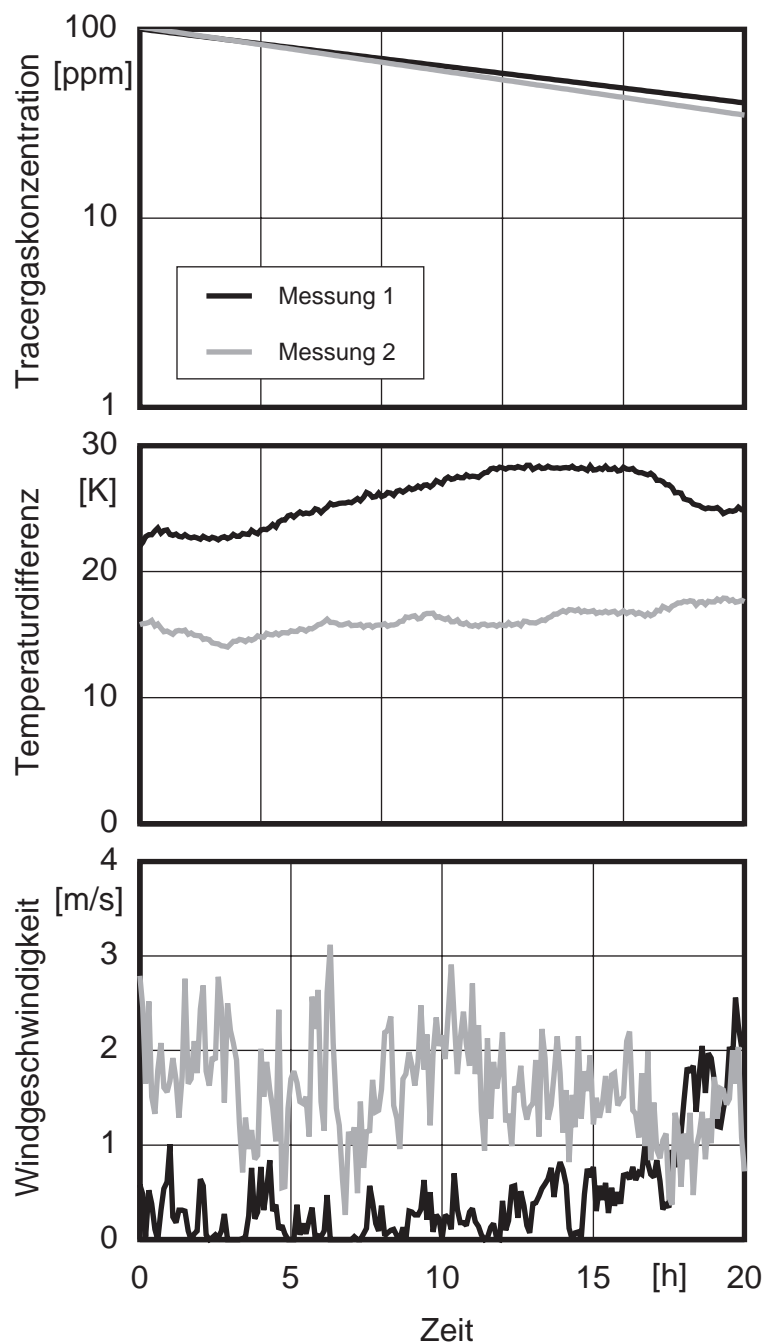


Bild 5.9: Konzentrationsabfall bei geschlossenem Fenster, Temperaturdifferenz Raum-/Außenluft und Windgeschwindigkeit. Messungen am 1. u. 2.12. und 12. u. 13.12.1994.

## 6. Meßergebnisse

Die Tracergas-Messungen mit der Konstant-Konzentrations-Methode erlauben unter Zugrundelegung des in Kap. 4 beschriebenen Auswerteverfahrens die direkte Ermittlung des Zuluftvolumenstroms. Bild 6.1 zeigt den zeitlichen Verlauf des Zuluftvolumenstroms, der sich aus Gleichung 3.13 mit einem Zeitschritt von  $\Delta t = 0,1$  h ergibt. Das Fenster befindet sich in Kippstellung und hat eine Öffnungsweite von 8 cm. Weiterhin ist in Bild 6.1 der Verlauf der Außen- und Raumlufttemperatur sowie der Windgeschwindigkeit und -richtung dargestellt. Diese Meßgrößen liegen ebenfalls in 6 min - Abständen vor. Zur Erläuterung der Einflußgrößen auf den gemessenen Zuluftvolumenstrom können grob vier Bereiche unterschieden werden.

- (i) Bei kleinen Windgeschwindigkeiten aus Nord-Nordwest - Richtung wird der Luftwechsel durch die Temperaturdifferenz von ca. 6 K bestimmt. Der Anstieg der Windgeschwindigkeit auf etwa 1,5 m/s wirkt sich auf den Luftwechsel nicht aus.
- (ii) Die Windrichtung dreht auf Süd und die Einflüsse unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten werden deutlich im resultierenden Zuluftvolumenstrom abgebildet. Bei nahezu gleichzeitigem Absinken der Temperaturdifferenz und Ansteigen der Windgeschwindigkeit überlagern sich die Effekte und führen zu einer Erhöhung des Luftwechsels.
- (iii) Die Temperaturdifferenz beträgt ca. 1 - 2 K, der Luftwechsel wird maßgeblich durch die Windanströmung hervorgerufen.
- (iv) Infolge steigender Temperaturdifferenz und sinkender Windgeschwindigkeit kommt es wie in (ii) zu einer Überlagerung der Einflußgrößen. Der minimale Luftwechsel tritt in dem Bereich kleiner Windgeschwindigkeit bei Südanströmung und gleichzeitig geringster Temperaturdifferenz auf.

Die im Bild 6.1 dargestellten Verläufe und die qualitative Beschreibung der unterschiedlichen Bereiche verdeutlichen, daß der Luftaustausch über das Fenster von den aufgeführten Einflußgrößen bestimmt wird, die nachfolgend im Einzelnen betrachtet werden.

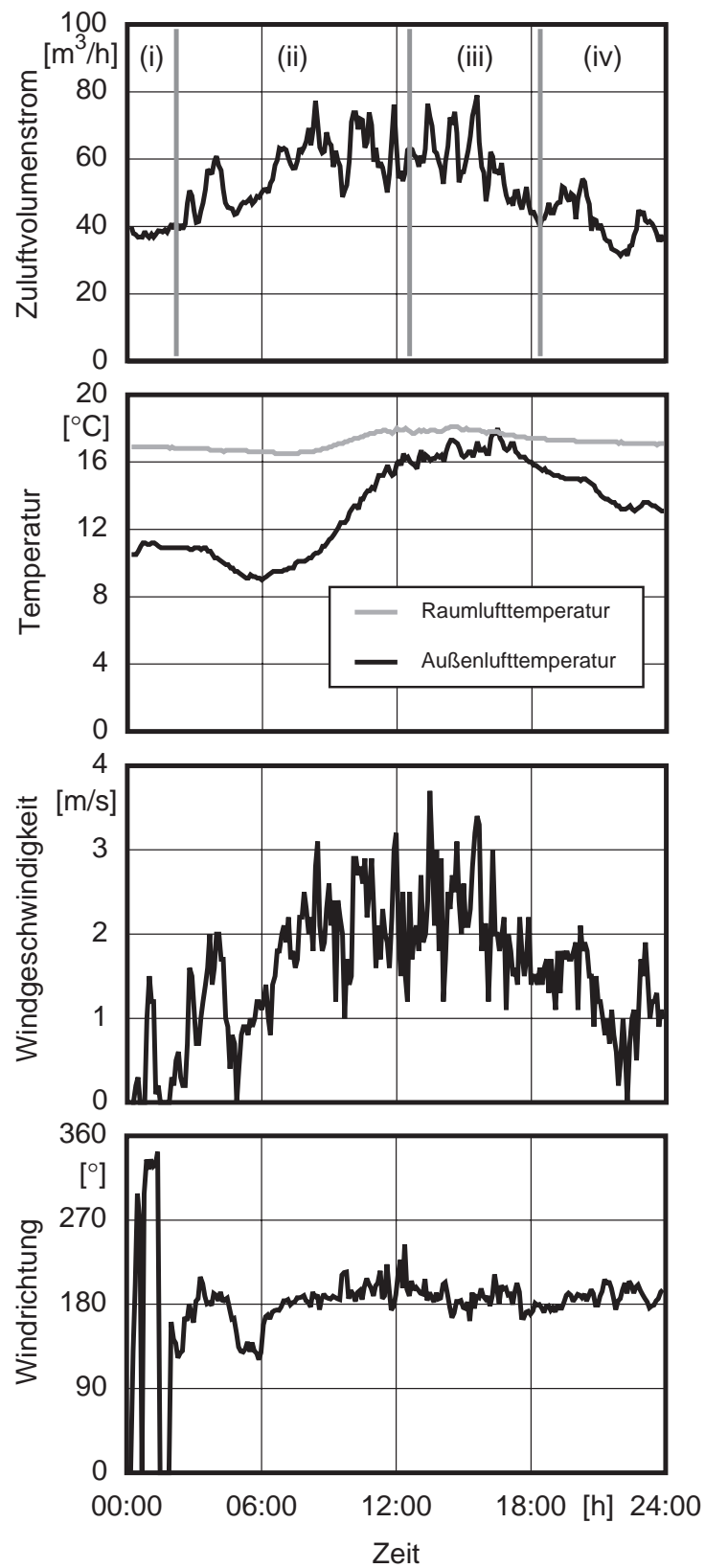


Bild 6.1: Zeitlicher Verlauf des Zuluftvolumenstroms, der Raum- und Außenlufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und -richtung. Kippstellung mit 8 cm Öffnungsweite. Messungen am 11.9.1994.



## 6.1 Temperatureinfluß

Theoretische Betrachtungen für stationäre Strömungsvorgänge zeigen, daß der Luftvolumenstrom durch eine große Einzelöffnung in der Gebäudehülle sich proportional zur Wurzel der Differenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur verhält, siehe z. B. [van der Maas I].

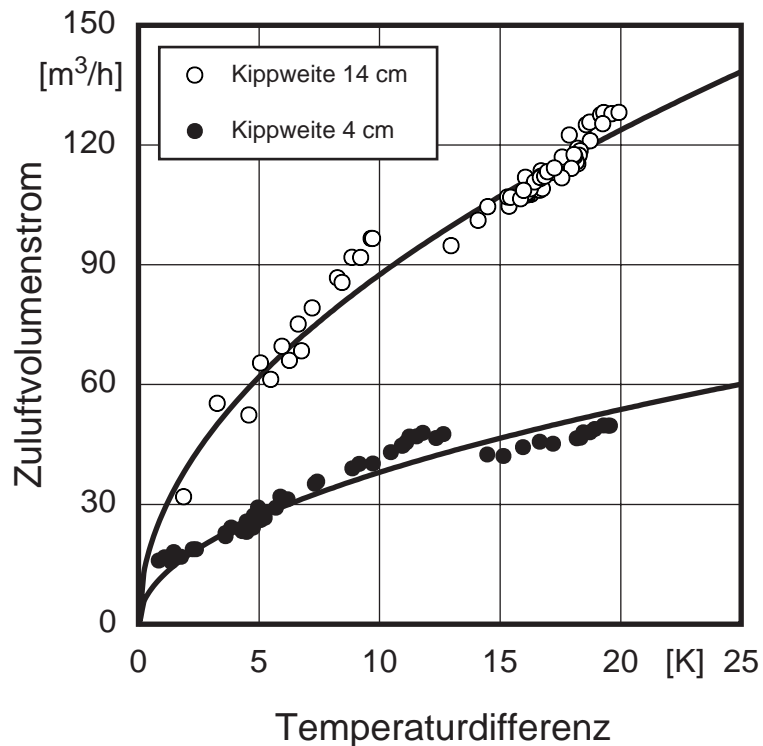


Bild 6.2: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen für die Kippöffnungen 4 cm und 14 cm. Windgeschwindigkeit  $u_v < 0,5$  m/s.

In Bild 6.2 sind exemplarisch die gemessenen Zuluftvolumenströme in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz für das Kippfenster bei 4 cm und 14 cm Öffnung dargestellt. Die Anpassung erfolgt mit einer Wurzelfunktion. Um den Windeinfluß möglichst gering zu halten, sind nur Meßdaten aufgetragen, bei denen die Windgeschwindigkeit kleiner als 0,5 m/s ist. Die Unstetigkeit des Verlaufs der abgebildeten Meßdaten, die sich für die Kippweite von 14 cm ab ca. 10 bis 13 K und für die Kippweite 4 cm ab ca. 13 bis 15 K zeigt, ist dadurch zu erklären, daß hier die Heizung im Meßraum eingeschaltet wird. Die lokalen Strömungsverhältnisse im Bereich des Fensters ändern sich infolge der Beheizung durch den direkt unterhalb der Öffnung angeordneten Heizkörper und bewirken eine Reduktion des Luftdurchgangs. Die eingetragenen Ausgleichskurven repräsentieren in etwa ei-

nen Mittelwert zwischen dem Fall des Heizsystems mit gleichmäßiger räumlicher Temperaturverteilung und dem der hier vorliegenden Heizflächenanordnung. Bild 6.3 zeigt die Auftragung des Zuluftvolumenstroms über die Temperaturdifferenz für alle betrachteten Kippstellungen des Fensters.

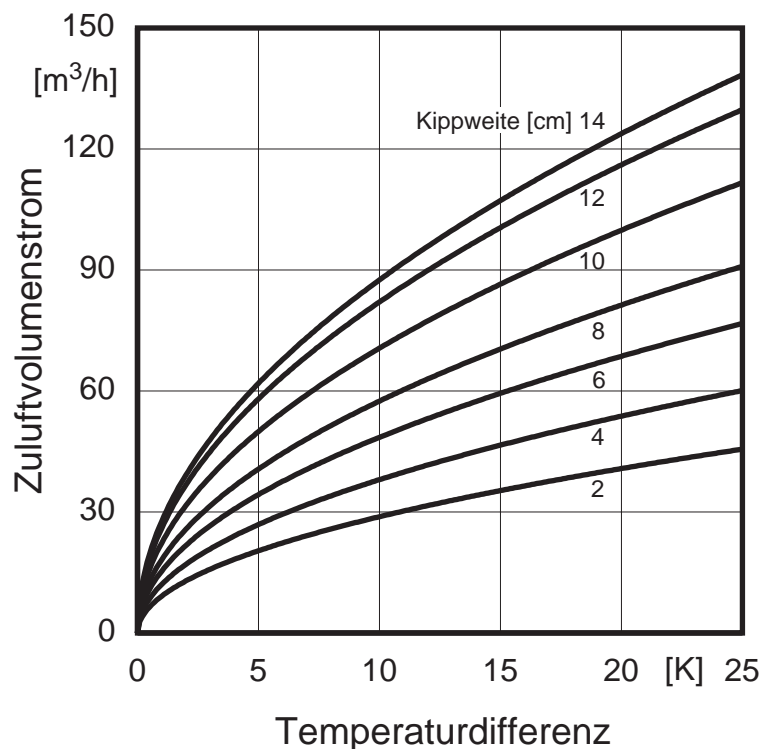


Bild 6.3: Darstellung des gemessenen Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz innen/außen für alle Kippstellungen. Windgeschwindigkeit  $u_v < 0,5$  m/s.

Theoretische Betrachtungen in [Daler] zeigen, daß der thermisch induzierte Luftwechsel mit einer einfachen Beziehung beschrieben werden kann. Überträgt man den dort aufgeführten Ansatz auf die vorliegende Problemstellung, so ergibt sich für das Kippfenster der Zuluftvolumenstrom zu

$$\dot{V} = 308 \alpha s \sqrt{\Delta\vartheta} \quad (6.1)$$

Die Durchflußzahl wird für das Kippfenster mit  $\alpha = 0,85$  angegeben. Bild 6.4 zeigt den Vergleich der vorliegenden Meßergebnisse, wie sie für das Kippfenster mit Öffnungsweiten von 4 und 14 cm bereits in Bild 6.2 dargestellt sind, mit dem Modellansatz gemäß Gleichung 6.1. Die Abweichungen betragen bei 4 cm Öffnungsweite ca. 15 % und bei 14 cm ca. 25 %. Bemerkenswert ist, daß die Werte gem. Gleichung 6.1 einmal unterhalb und einmal oberhalb der Meßwerte liegen.

Der Grund für die auftretenden Abweichungen liegt vermutlich darin, daß die aus einer geometrischen Beschreibung abgeleitete Fensteröffnungsfläche nur unzureichend zu verallgemeinern ist. Auf diesen Aspekt wird in Kap. 7 näher eingegangen.

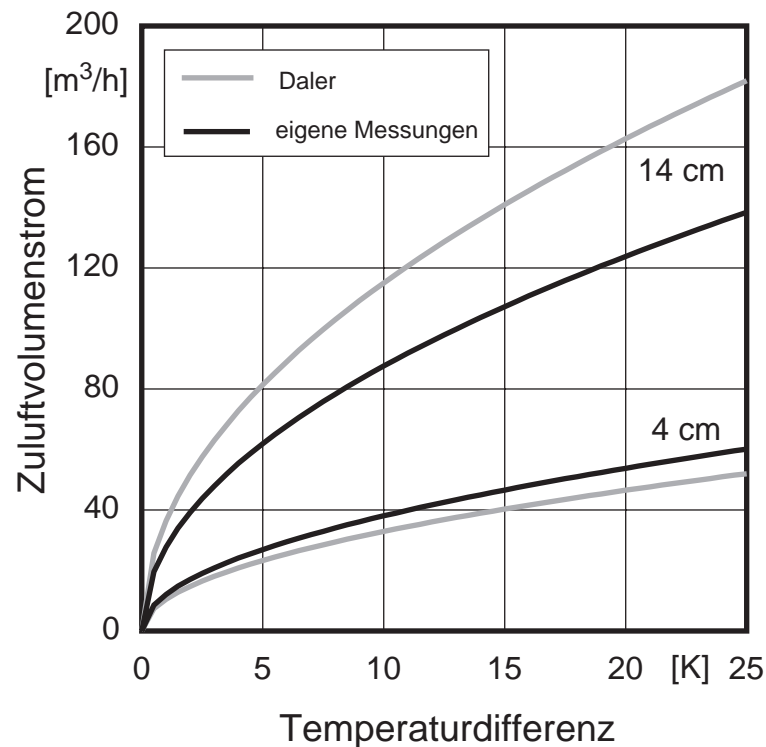


Bild 6.4: Vergleich der Meßergebnisse für Kippöffnungen von 4 cm und 14 cm mit dem Ansatz von [Daler] gem. Gleichung 6.1.

Eine andere Form der Darstellung des Zusammenhangs zwischen Luftwechsel und Temperaturdifferenz zeigt Bild 6.5. Hier ist der Zuluftvolumenstrom über die Wurzel der Temperaturdifferenz aufgeführt. Man erkennt, daß auch ohne eine wirksame Temperaturdifferenz ein Luftaustausch stattfindet. In [van der Maas I] [Phaff] wird dieser Effekt auf Diffusion und lokale Turbulenzen zurückgeführt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hierzu keine detaillierten Untersuchungen angestellt.

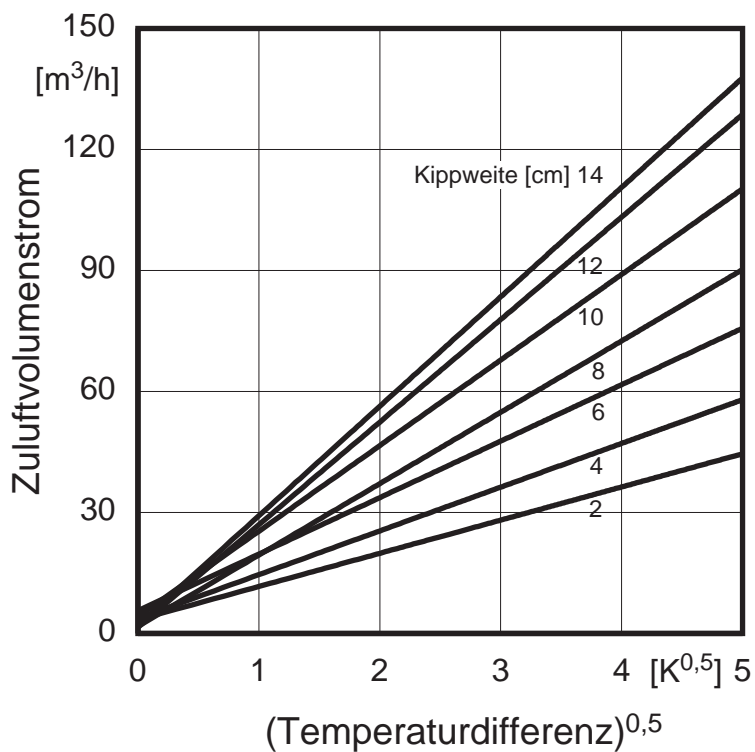


Bild 6.5: Darstellung des gemessenen Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Wurzel der Temperaturdifferenz innen/außen für alle Kippstellungen. Windgeschwindigkeit  $u_v < 0,5$  m/s.

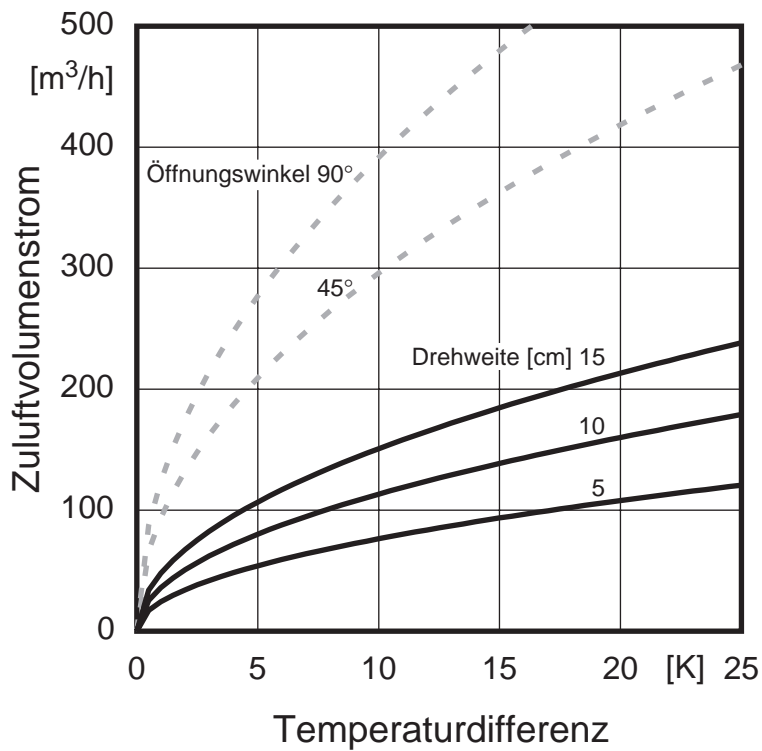


Bild 6.6: Darstellung des gemessenen Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz innen/außen für Öffnungsweiten von 5, 10 und 15 cm sowie Öffnungswinkel von 45° und 90° in Drehstellung. Windgeschwindigkeit  $u_v < 0,5$  m/s.

Die Abhängigkeit des Zuluftvolumenstroms von der Temperaturdifferenz für das betrachtete Drehfenster ist in Bild 6.6 aufgetragen. Für die Öffnungswinkel von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  stehen nicht ausreichend Meßdaten zur Verfügung, so daß die Zusammenhänge nur näherungsweise beschrieben werden können.

Aufgrund der veränderten Öffnungsgeometrie ergibt sich gegenüber dem Kippfenster ein höherer Luftwechsel. Bei annähernd gleicher Öffnungsfläche von Kipp- und Drehfenster tritt bei der Kippstellung ein nur ca. 0,6-facher Luftaustausch gegenüber der Drehstellung auf. Dieser Wert kann für Öffnungsweiten von 10 cm aus den Kurven in den Bildern 6.3 und 6.6 nachvollzogen werden. Eine Bestätigung finden diese Ergebnisse in den theoretischen Betrachtungen von [Daler]. Der maximale Luftaustausch durch eine Einzelöffnung findet bei reiner Temperatureinwirkung und unter Zugrundelegung eines hinreichend dichten Raumes statt, wenn die neutrale Achse in der halben Fensteröffnung liegt. Dieser Fall tritt nur bei achsensymmetrischen Öffnungen auf. Bei einem Kippfenster verschiebt sich die neutrale Achse nach oben und führt zu einer Verringerung des Luftaustausches.

## 6.2 Windeinfluß

Beim windinduzierten Luftwechsel wirken sich sowohl Anströmgeschwindigkeit als auch Anströmrichtung aus [Daler] [van der Maas I]. Anders als bei der Betrachtung des Luftaustausches infolge von Temperaturdifferenzen muß hierbei auch die Lage des Gebäudes und seine Geometrie beachtet werden.

Zur Beurteilung des Windeinflusses ist es zunächst sinnvoll, den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und -richtung aufzuzeigen. Hierzu dient die Darstellung in Bild 6.7, wo in einem Polardiagramm die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung abgebildet ist. Es sind jeweils 1h - Mittelwerte für die Winddaten berücksichtigt. Das Fenster befindet sich in Kippstellung mit einer Öffnungsweite von 12 cm. Diese Öffnungsstellung wird für alle weiteren Untersuchungen in diesem Abschnitt zugrundegelegt, da hier die meisten Meßdaten zur Verfügung stehen.

Aus Bild 6.7 ist ersichtlich, daß hohe Windgeschwindigkeiten bei den Anströmrichtungen Ost, Süd und Nordwest vorliegen. Für die weiteren Ausführungen werden daher folgende Bereiche der Windrichtung herangezogen:

Ost  $45^\circ$ - $135^\circ$ ; Süd  $135^\circ$ - $225^\circ$ ; Nordwest  $270^\circ$ - $0^\circ$

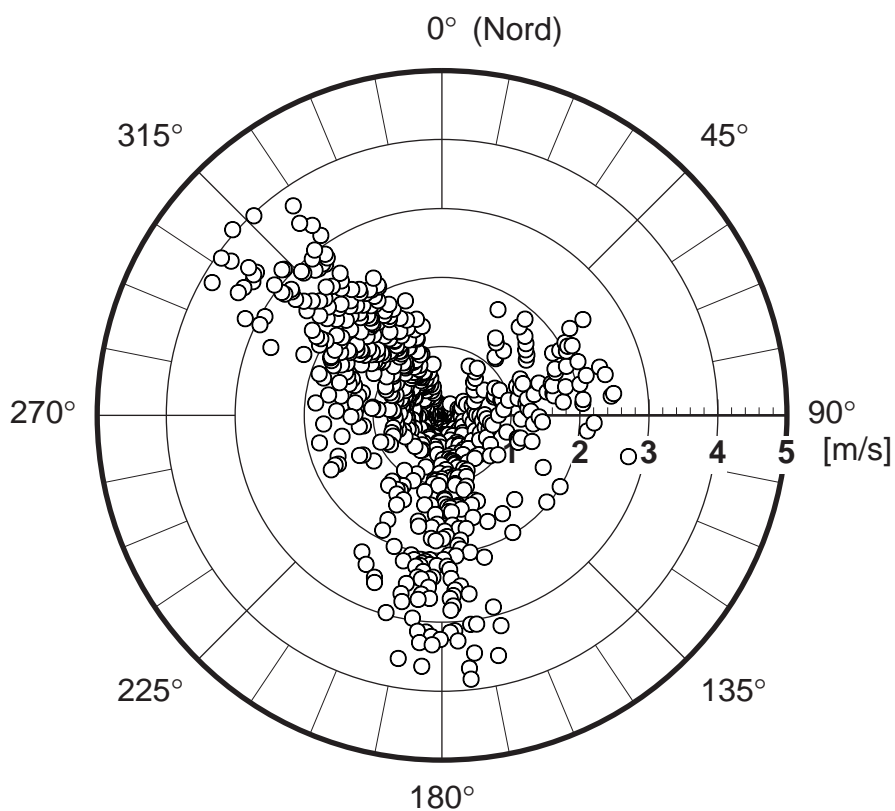


Bild 6.7: Darstellung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung. 1h-Mittelwerte. Kippstellung der Fensters von 12 cm.

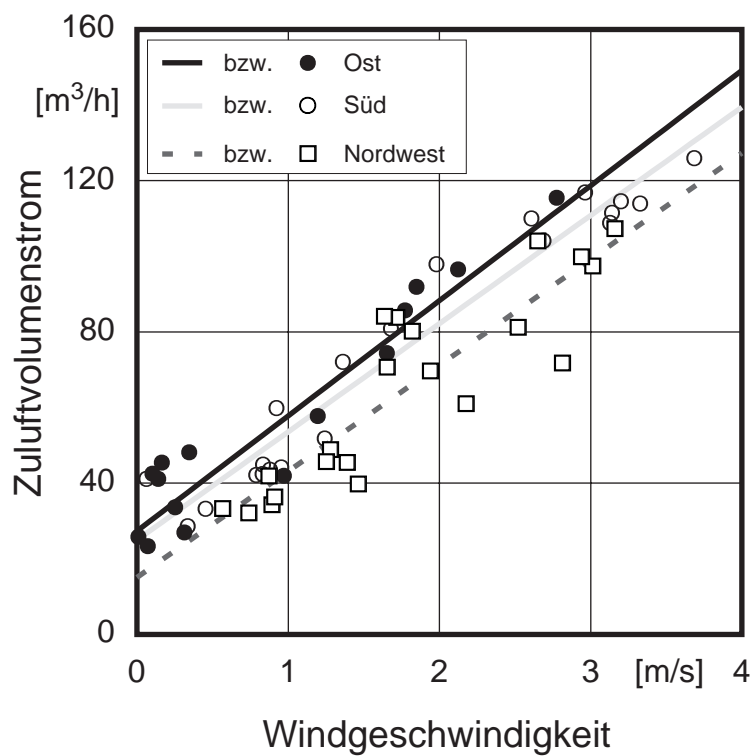


Bild 6.8: Darstellung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. 1h-Mittelwerte. Kippstellung der Fensters von 12 cm. Temperaturdifferenz  $2\text{K} < \Delta\vartheta < 4\text{K}$ .

Um den Einfluß der Windgeschwindigkeit auf den Luftwechsel isoliert zu betrachten, sind für die Darstellungen in Bild 6.8 die Meßergebnisse für Temperaturdifferenzen zwischen 2 und 4 K selektiert (Für den Bereich unter 2 K liegen nicht genügend Meßdaten vor). Erkennbar ist, daß bei Süd- und Ostanströmung ähnliche Verhältnisse vorliegen, d.h. der Zuluftvolumenstrom ist proportional zur Windgeschwindigkeit und die Steigung der Ausgleichsgeraden ist näherungsweise gleich. Bei der Anströmrichtung Nordwest weisen die Meßwerte eine größere Streuung auf und es stellen sich geringere Volumenströme ein als bei den beiden anderen Windrichtungen.

Der resultierende Zuluftvolumenstrom bei gleichzeitiger Einwirkung von Thermik und Wind ist in Bild 6.9 für die Südanströmung wiedergegeben. Es zeigt sich, daß sich die Effekte keinesfalls additiv überlagern. Es liegen vielmehr Bereiche vor, in denen der reine Temperatureinfluß überwiegt, und Bereiche, in denen der Luftwechsel maßgeblich von der Windgeschwindigkeit hervorgerufen wird. Diese Ergebnisse finden Bestätigung in den theoretischen und experimentellen Untersuchungen von [Warren].

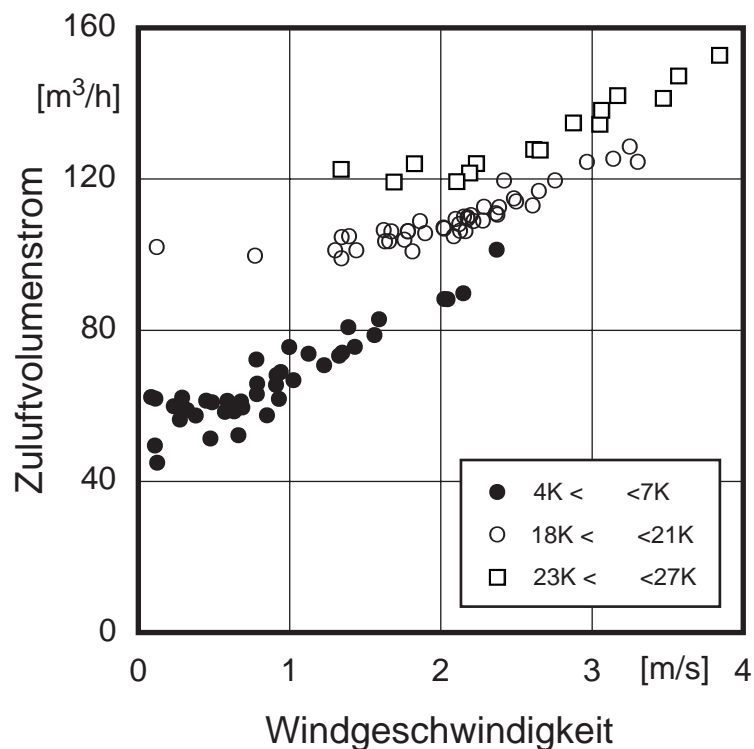


Bild 6.9: Darstellung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. 1h-Mittelwerte. Kippstellung der Fensters von 12 cm.

### 6.3 Einfluß der Einbausituation des Fensters

Bei den bisherigen Ausführungen zu den Meßergebnissen ist vorausgesetzt, daß das Fenster bündig an der Innenseite der Außenwand anschließt und somit jeweils eine freie Öffnungsfläche zum Raum hin gewährleistet ist. In der Praxis ist dieser Fall jedoch nur selten anzutreffen. Aufgrund baupraktischer Gegebenheiten, ästhetischer Gestaltung der Fassade und nicht zuletzt bauphysikalischer Anforderungen, die eine Reduktion der Wärmebrückenwirkung betreffen, wird das Fenster mehr oder weniger tief in der Laibung angeordnet. Um den Einfluß einer so veränderten Einbausituation zu untersuchen, wird um das Kippfenster herum, wie in Bild 5.6 dargestellt, ein Rahmen angebracht. Die sich ergebende "Einbautiefe" von 20 cm und der seitliche Abstand von 2 cm sind bewußt recht extrem gewählt, aber durchaus nicht unüblich.

Die Ergebnisse der Messungen, bei denen die Temperaturdifferenz als treibende Kraft auftritt, bei vernachlässigbarem Windeinfluß, sind in Bild 6.10 aufgetragen. Die Meßwerte werden wiederum durch eine Wurzelfunktion angenähert. Bei den Kippstellungen von 2 und 10 cm treten bei Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Raumluft von 25 K Zuluftvolumenströme von ca. 40 bzw. ca. 65 m<sup>3</sup>/h auf. Zum Vergleich sind ebenfalls die in Bild 6.3 dargestellten Verläufe für die gleichen Fensterstellungen ohne Rahmen abgebildet. Wie erwartet ergibt sich durch die Anordnung des Rahmens eine Reduzierung des Luftwechsels. Bei der Kippweite von 2 cm fällt diese relativ gering aus, da die freie Öffnungsfläche eine vergleichsweise geringe Veränderung aufweist. Für die Öffnungsweite von 10 cm zeigen die Meßergebnisse, daß die veränderte Einbausituation eine Abnahme des Zuluftvolumenstroms von nahezu 50 % bewirkt.

Es ist also festzuhalten, daß die Anordnung des Fensters in der Laibung einen entscheidenden Einfluß auf den Luftaustausch hat. Kennlinien zur Beschreibung des Luftwechsels infolge thermischer Einwirkung, wie sie in Bild 6.3 und auch in [Daler] und [Panzhauser] aufgeführt sind, sind somit nur unter Beachtung der zugrundegelegten Randbedingungen verwendbar.



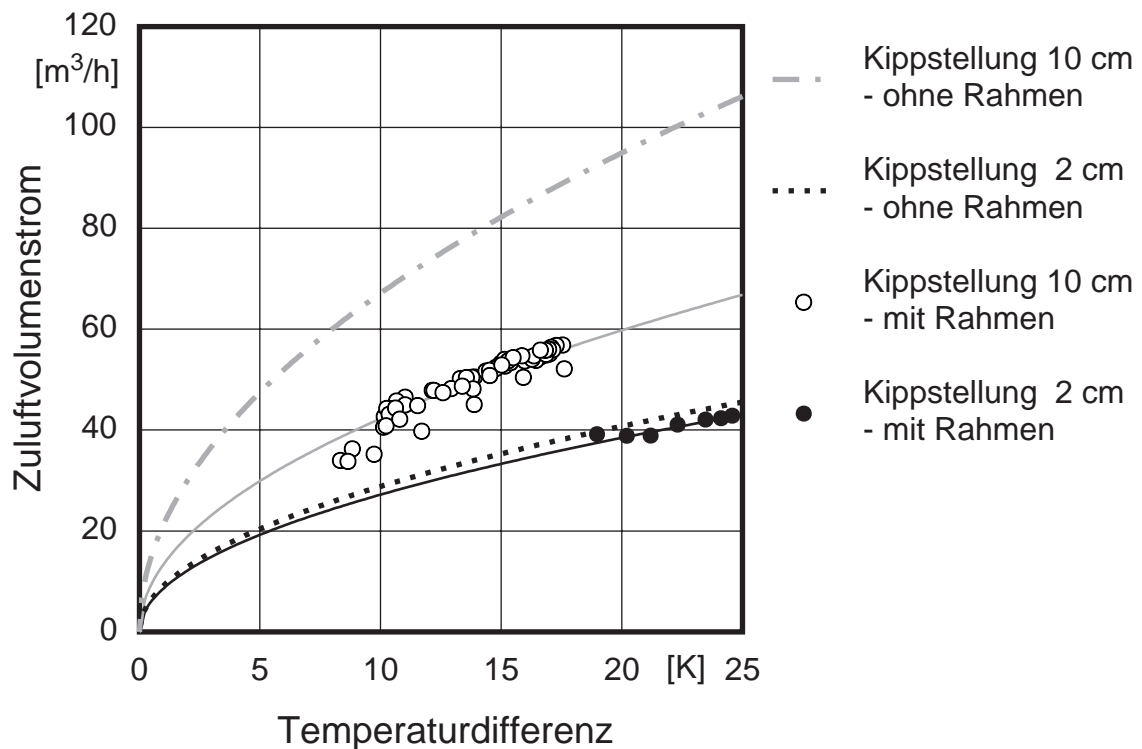


Bild 6.10: Darstellung der Abhängigkeit des Zuluftvolumenstroms von der Temperaturdifferenz innen/außen für die Kippweiten 2 und 10 cm, jeweils mit und ohne Rahmen.

## 6.4 Fehlerbetrachtung

### 6.4.1 Konstant-Konzentrations-Methode

Der zufällige Fehler einer Einzelmessung des Zuluftvolumenstroms wird mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Auswertebeziehung in Gleichung 3.12 angegeben. Vernachlässigt man den Fehlereinfluß bei der Bestimmung der Außen- und Raumlufttemperatur und des Raumvolumens aufgrund der geringen Beträge und geht näherungsweise von  $T_{zu}/T_i \approx 1$  aus, ergibt sich die mittlere quadratische Abweichung des Zuluftvolumenstroms zu

$$(\delta\dot{V}_m)^2 = \left| \frac{1}{\Delta C_m(t)} \delta F \right|^2 + \left| \frac{F}{\Delta C_m(t)^2} \delta C \right|^2 + \left| \frac{V}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t)} \delta C \right|^2 + \left| \frac{V}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t + \Delta t)} \delta C \right|^2 \quad (6.2)$$

mit

$$\delta C = \delta(\Delta C_m(t)) = \delta(\Delta C(t)) = \delta(\Delta C(t + \Delta t))$$

Der Meßfehler des Tracergasvolumenstroms wird vom Gerätehersteller mit  $\pm 1\%$  angegeben und beträgt für den vorliegenden Meßbereich  $\pm 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$ .

Der Fehler der  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentrationsmessung ergibt sich aus folgenden Anteilen:

- Die Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift des Gasanalysators beträgt nach Herstellerangaben bis 2 ppm pro Woche. Es werden in regelmäßigen Abständen Nullpunkt- und Empfindlichkeitskalibrierungen durchgeführt und die Meßwerte werden unter Annahme einer zeitlich linearen Drift korrigiert. Die Empfindlichkeitskalibrierung erfolgt mit einem Gasgemisch  $\text{N}_2\text{O}$  in  $\text{N}_2$  bei einer Konzentration von  $90,4 \pm 2$  ppm.
- Der Linearitätsfehler des Analysators beträgt bis 1 % der Meßspanne.
- Unvollständige Vermischung des Tracergases mit der Raumluft.

In [Sherman II] wird für eine Beispielrechnung der Fehler einer Konzentrationsmessung, der aus den o.g. Punkten folgt, mit 10 ppm angesetzt und resultiert im wesentlichen aus der Unsicherheit hinsichtlich des Vermischungskriteriums. Für Einzelmessungen in Felduntersuchungen liegt dieser Wert sicherlich in einer realistischen Größenordnung. Umfangreiche Untersuchungen in dem betrachteten Versuchsgebäude, die in [Behr] und [Volkman] dokumentiert sind, zeigen, daß unter Laborbedingungen eine hohe Güte der Durchmischung erreicht wird und damit der Meßfehler der Konzentration geringer einfließt. Eine genaue Quantifizierung des Konzentrationsmeßfehlers ist für die durchgeführten Meßreihen nicht möglich und kann nur schätzungsweise mit 5 ppm angegeben werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Fehleranteile in Gleichung 6.2 wird deutlich, daß der letzte Term, der die zeitliche Änderung der Tracergaskonzentration berücksichtigt, den Gesamtfehler bestimmt (vergl. [Sherman II]).

Mit der vereinfachten Annahme, daß die mittleren Tracergaskonzentrationen in Gleichung 6.2 dem Sollwert, der für alle Messungen mit 60 ppm vorgegeben ist, entsprechen und unter Berücksichtigung des Auswertintervalls von einer Stunde, ergibt sich der absolute Fehler des Zuluftvolumenstroms zu  $9,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dieser Wert kann als Gesamtfehler für alle Messungen betrachtet werden.

Der relative Fehler des Zuluftvolumenstroms ist für den repräsentativen Bereich der Meßwerte in Bild 6.11 aufgetragen. Hierbei ist zum Vergleich auch der relative Fehler aufgeführt, der sich bei einem Konzentrationsmeßfehler von  $\delta C = 10$  ppm ergibt.

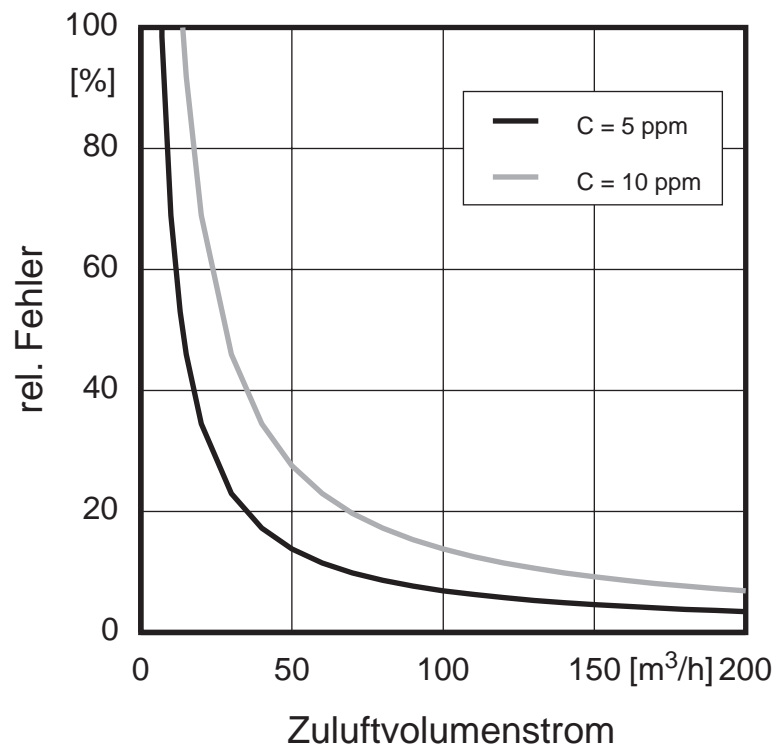


Bild 6.11: Relativer Fehler  $\delta\dot{V}_m / \dot{V}_m$  in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom bei einem Auswertzeitraum von einer Stunde.

#### 6.4.2 Konzentrationsabfall-Methode

Für die Konzentrationsabfall-Methode kann die mittlere quadratische Abweichung des Luftwechsels aus Gleichung 3.16 mit

$$(\delta n_m)^2 = \left| \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t)} \delta C \right|^2 + \left| \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t + \Delta t)} \delta C \right|^2 \quad (6.3)$$

bestimmt werden. Wie zuvor in Abschnitt 6.4.1 wird der Fehlereinfluß der Temperaturmessung vernachlässigt. Ebenso gilt

$$\delta C = \delta(\Delta C(t)) = \delta(\Delta C(t + \Delta t))$$

Werden in Gleichung 6.3 die Ausgangskonzentration  $C(t)$  und der Fehler  $\delta C$  als konstante Werte angesehen, fällt der Fehler  $\delta n$  schnell mit wachsender Auswertzeit  $t$  ab. Durch die Verringerung der Tracergaskonzentration  $\Delta C(t + \Delta t)$  ergibt sich aber mit zunehmendem Auswertzeitraum ein wachsender Einfluß des Fehlers  $\delta C$ , so daß ab einer bestimmten Meßdauer  $\delta n$  wieder größer wird. Dies zeigt

auch die folgende Betrachtung für den relativen Fehler  $\delta n_m/n_m$ . Gleichung 6.3 wird umgeformt zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \sqrt{\left(\frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)}\right)^2 + \frac{\delta C^2 e^{-2n_m \Delta t}}{\Delta C(t)^2 e^{-2n_m \Delta t}}} \quad (6.4)$$

Aus Gleichung 3.16

$$n_m = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (3.16)$$

folgt

$$\Delta C(t + \Delta t) = \Delta C(t) e^{-T_i/T_{zu} n_m \Delta t} \quad (6.5)$$

Trifft man wiederum die Vereinfachung  $T_i/T_{zu} \approx 1$  und quadriert Gleichung 6.5 erhält man

$$\Delta C(t + \Delta t)^2 = \Delta C(t)^2 e^{-2n_m \Delta t} \quad (6.6)$$

Der relative Fehler des Luftwechsels führt nach Einsetzen von Gleichung 6.6 in Gleichung 6.4 zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \sqrt{\left(\frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)}\right)^2 (1 + e^{-2n_m \Delta t})} \quad (6.7)$$

oder

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)} \sqrt{1 + e^{-2n_m \Delta t}} \quad (6.8)$$

Ein Minimum ergibt sich etwa bei einer Auswertzeitspanne  $t = \tau_n = 1/n_m$ . Der relative Fehler führt dann zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} \approx 1,06 \frac{\delta C}{C(\tau_n)} \approx 2,9 \frac{\delta C}{C(t)} \quad (6.9)$$

Der Verlauf des nach Gleichung 6.8 bestimmten relativen Fehlers ist in Bild 6.12 über dem Verhältnis von Auswertzeitraum zu nominaler Zeitkonstante darge-

stellt. Bild 6.13 zeigt die Abhängigkeit des relativen Fehlers des Luftwechsels vom Verhältnis  $C(t + \Delta t) / C(t)$ . Der kleinste Fehler resultiert, wenn die Ausgangskonzentration  $C(t)$  auf ca. 37 % abgesunken ist (vergl. [Roulet III]). Den Berechnungen für die in Bild 6.12 und 6.13 dargestellten Abhängigkeiten sind jeweils Ausgangskonzentrationen von 100 ppm und Konzentrationsmeßfehler von 5 bzw. 10 ppm zugrunde gelegt.

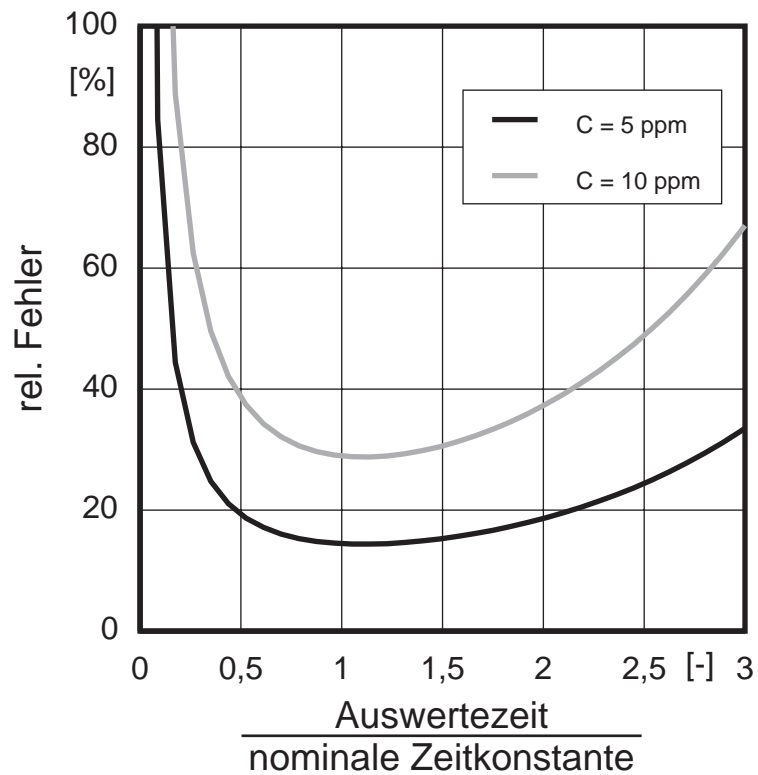


Bild 6.12: Rel. Fehler  $\delta n_m / n_m$  in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Auswertzeit zu nominaler Zeitkonstante (Ausgangskonzentration 100 ppm).

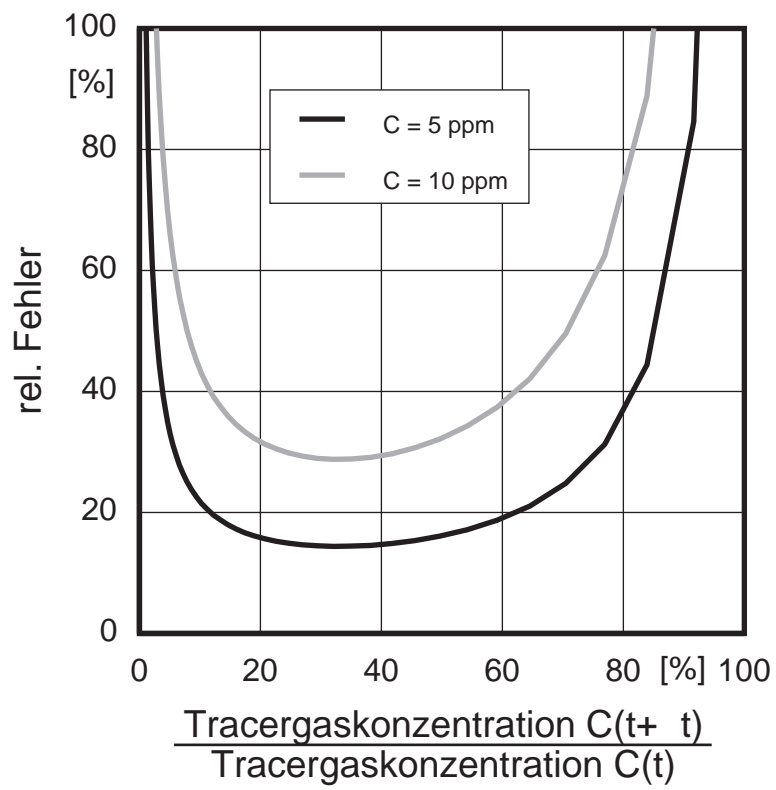


Bild 6.13: Rel. Fehler  $\delta n_m/n_m$  in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Tracergaskonzentrationen aufeinanderfolgender Meßzeitpunkte (Ausgangskonzentration 100 ppm).

## 7. Rechnerische Methoden zur Ermittlung des Luftwechsels

Der Luftdurchgang durch eine Öffnung in der Gebäudehülle wird bestimmt von der wirksamen Druckdifferenz über die Öffnung und der komplexen Öffnungsgeometrie. Die Druckdifferenz wird, wie in Kap. 6 dargestellt, durch Temperaturunterschiede zwischen dem Äußeren und dem Inneren eines Gebäudes und durch Windanströmung hervorgerufen. Rechenmodelle, welche die Strömungsvorgänge durch große Öffnungen infolge dieser Einflußgrößen beschreiben, basieren heutzutage auf der Betrachtung einer inkompressiblen, reibungslosen Strömung, formuliert in der Bernoulli-Gleichung und der Überlagerung instationärer Strömungseffekte durch Druckschwankungen und turbulenter Diffusion. Eine Zusammenstellung der strömungsmechanischen Grundlagen und die Darstellung verschiedener Modellansätze ist in [van der Maas I, II u. III] [Feustel] [Pelletret] zu finden. Der Einfluß von Druckschwankungen wird in [Rao] [Haghighat] behandelt.

### 7.1 Gewählter Modellansatz

Zur rechnerischen Beschreibung des einseitigen Luftwechsels infolge natürlicher Lüftung wird von dem Ansatz in [Phaff] ausgegangen.

Hier wird eine effektive Geschwindigkeit in einer definierten Fensteröffnung beschrieben, die durch Druckunterschiede infolge Windanströmung  $\Delta p_w$ , Temperaturdifferenz innen - außen  $\Delta p_\vartheta$  und turbulenter Effekte  $\Delta p_t$  erzeugt wird und in allgemeiner Form in Gleichung 7.1 dargestellt ist.

$$u_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta p_w + \Delta p_\vartheta + \Delta p_t)} \quad (7.1)$$

Hieraus wird in [Phaff] der Modellansatz

$$u_{\text{eff}} = \sqrt{(C_1 u_{\text{met}}^2 + C_2 H \Delta\vartheta + C_3)} \quad (7.2)$$

abgeleitet, mit den Koeffizienten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$ . Die Größe  $u_{\text{met}}$  ist die Windgeschwindigkeit am Meßort,  $\Delta\vartheta$  bedeutet die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft und  $H$  ist die lichte Höhe der Öffnung.

Zur Formulierung des rechnerischen Zuluftvolumenstroms ist es erforderlich, eine Öffnungsfläche festzulegen, die hier mit  $A_{\text{eff}}$  bezeichnet wird und sich aus

$$A_{\text{eff}} = A_l \Theta \quad (7.3)$$

ergibt.  $A_l$  ist die Fläche der lichten Fensteröffnung und  $\Theta$  ein Durchflußverhältnis, welches von der jeweiligen Fensterstellung abhängt.

Mit den genannten Einflußgrößen läßt sich das Modell für die Bestimmung des Luftvolumenstroms über das Fenster gem. Gleichung 7.4 angeben.

$$\dot{V}_{zu,R} = 3600 \frac{1}{2} A_{\text{eff}} \sqrt{(C_1 u^2 + C_2 H \Delta\vartheta + C_3)}$$

oder

$$\dot{V}_{zu,R} = 3600 \frac{1}{2} A_l \Theta \sqrt{(C_1 u^2 + C_2 H \Delta\vartheta + C_3)} \quad (7.4)$$

Es wird die halbe effektive Öffnungsfläche in Ansatz gebracht, wobei davon ausgegangen wird, daß die Luft durch jeweils eine Hälfte der Öffnung ein- und austritt. Der Index R kennzeichnet die rechnerisch ermittelte Größe.

## 7.2 Definition des Durchflußverhältnisses

In Anlehnung an die Ausführungen in [Phaff] kann das Durchflußverhältnis  $\Theta$  über ein Flächenverhältnis angegeben werden

$$\Theta = \frac{A_{\text{eq}}(\alpha)}{A_{\text{eq}}(\alpha = 90^\circ)} \quad (7.5)$$

mit

$$A_{\text{eq}}(\alpha) = \left( \frac{1}{A_l^2} + \frac{1}{A_s^2} \right)^{-0,5}$$

$A_s$  ist hierbei die Summe der seitlichen Öffnungsflächen bei einem Fensteröffnungswinkel  $\alpha$  (siehe Bild 7.1).

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

Die Definition der Flächen  $A_l$  und  $A_s$  ist in Bild 7.1 dargestellt.



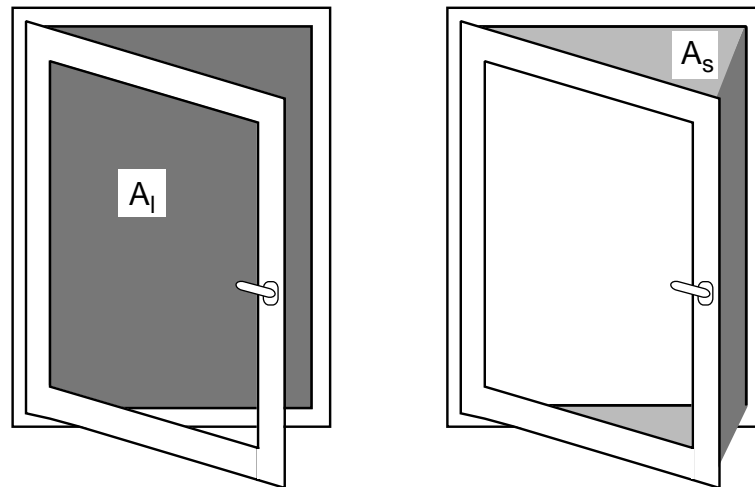


Bild 7.1: Definition der Flächen  $A_I$  und  $A_S$ .

Die effektive Öffnungsfläche wird somit über ein Durchflußsystem zweier Öffnungen formuliert, wie es in [Daler] hergeleitet ist.

Das Durchflußverhältnis  $\Theta$  gem. Gleichung 7.4 läßt sich mit den in Kapitel 5 angegebenen Fensterabmessungen berechnen.

Eine andere Möglichkeit der Ermittlung von  $\Theta$  basiert auf experimentellen Untersuchungen. Hierzu werden die Meßergebnisse aus Kap. 6 herangezogen und durch Luftwechsellmessungen mit der Konzentrations-Abfall-Methode bei gleichen meteorologischen Randbedingungen für unterschiedlichen Fensterstellungen ergänzt. Bezieht man den Zuluftvolumenstrom bei einem Öffnungswinkel  $\alpha$  des Fensters auf den bei  $\alpha = 90^\circ$ , ergibt sich der Zusammenhang

$$\Theta_T = \frac{\dot{V}_{zu}(\alpha)}{\dot{V}_{zu}(\alpha = 90^\circ)} \quad (7.6)$$

mit dem Index T, der den Bezug zur Tracergasmessung kennzeichnet. Für die Drehflügelanordnung sind die experimentell gefundenen und die aus der geometrischen Beziehung berechneten Werte des Durchflußverhältnisses in Bild 7.2 dargestellt.

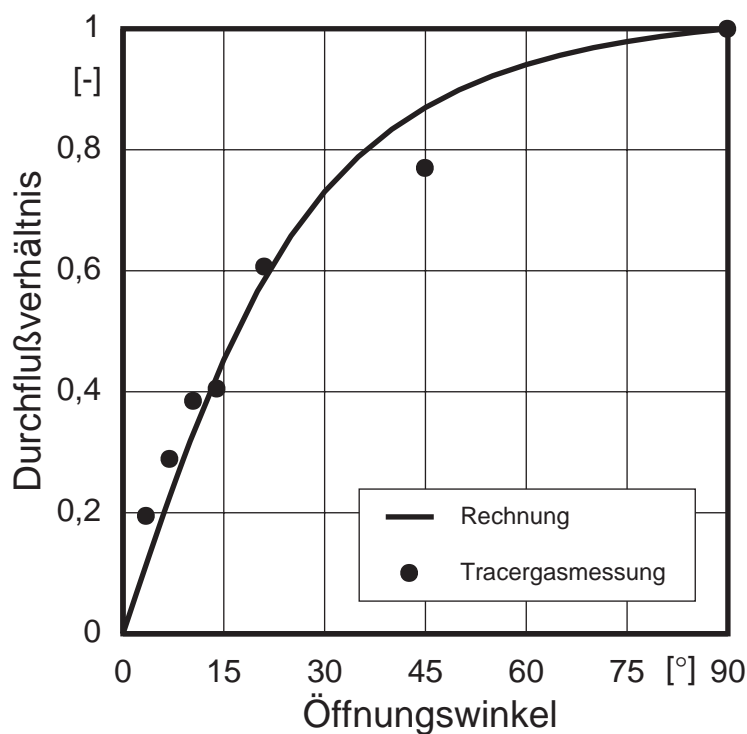


Bild 7.2: Durchflußverhältnis  $\Theta$  des Drehflügelfensters in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel  $\alpha$ . Darstellung der berechneten und gemessenen Werte.

Es wird deutlich, daß über einen weiten Bereich großer Öffnungswinkel eine Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte vorliegt und somit die für praktische Anwendungen einfach zu bestimmende geometrische Beziehung Gültigkeit hat. Dies wird auch in den experimentellen Untersuchungen von [Warren] bestätigt.

Im Bereich kleiner Öffnungswinkel kann das Durchflußverhältnis aus den geometrischen Beziehungen nur unzureichend beschrieben werden. Je nach Falzausbildung, Dicke des Fensterrahmens und Einbausituation des Fensters in der Laibung ändern sich die Flächenverhältnisse und somit die effektive Öffnungsfläche. Die Fläche geht in Gleichung 7.4 linear ein und bei der rechnerischen Bestimmung des Volumenstroms können, wie aus Bild 7.2 zu ersehen, große Fehler auftreten.

Der Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen  $\Theta$ -Werten für das Kipfenster ist in Bild 7.3 dargestellt. Hier liegen die Meßwerte im Gegensatz zum betrachteten Drehfenster bei freier Öffnungsfläche dichter bei den Rechenwerten. Große Abweichungen treten jedoch bei dem Fall "Kipfenster mit Rahmen" auf. Eine geometrische Beschreibung ist hierfür allerdings auch nicht vorgesehen.

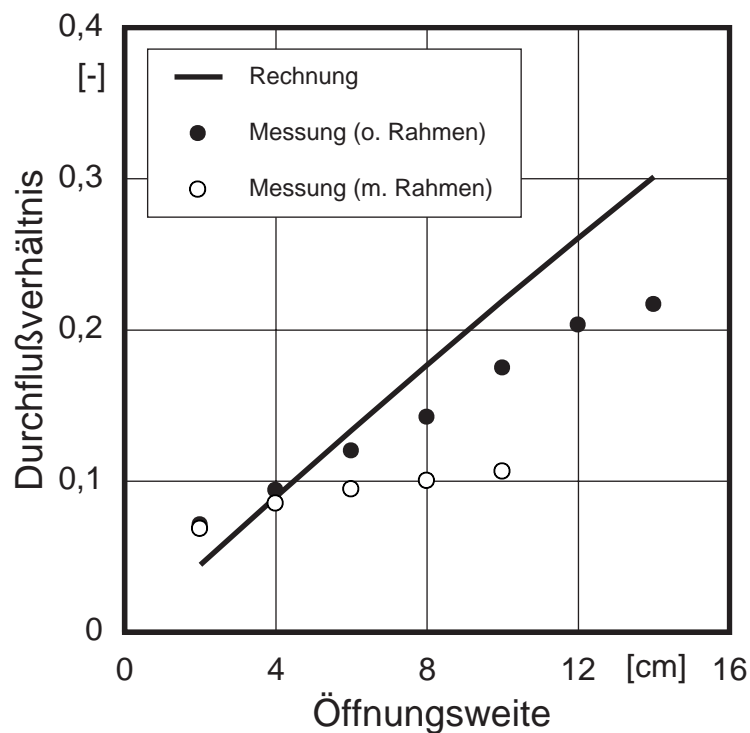


Bild 7.3: Durchflußverhältnis  $\Theta$  des Kippflügel Fensters mit und ohne Rahmen in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel  $\alpha$ . Darstellung der berechneten und gemessenen Werte.

Die Notwendigkeit der experimentellen Ermittlung von  $\Theta$  wird weiterhin deutlich, wenn man die Meßergebnisse bei thermisch bedingten Luftwechsel in Kap. 6 betrachtet. Bei gleicher freier Öffnungsfläche der jeweiligen Öffnungsstellung beträgt der Luftaustausch am Kippfenster nur ca. 60 % des Wertes, der sich beim Drehfenster einstellt. Dies wird mit der Verschiebung der neutralen Achse begründet. Soll der Modellansatz in Gleichung 7.4 sowohl für Kipp- als auch Drehfenster gelten, können daher nur meßtechnisch ermittelte Werte für das Durchflußverhältnis herangezogen werden.

Zur Definition des Durchflußverhältnisses kann abschließend gesagt werden, daß auf der Basis der vorliegenden Untersuchungen nur experimentell gefundene Werte herangezogen werden können. Die Ermittlung aus geometrischen Abmessungen der Fensteröffnung ist für praktische Anwendungen sicherlich wünschenswert, führt allerdings mit dem dargestellten Ansatz im Bereich kleiner Öffnungsweiten zu nicht akzeptablen Abweichungen.

Eine Zusammenstellung der zugrundegelegten  $\Theta$ -Werte für die weiteren Betrachtungen ist in Tabelle 7.1 wiedergegeben.

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der experimentell ermittelten Durchflußverhältnisse  $\Theta_T$  für die Modellanpassung.

Kipfenster				Drehfenster		
Öffnungsweite	Öffnungswinkel	Durchflußverhältnis ohne Rahmen	Durchflußverhältnis mit Rahmen	Öffnungsweite	Öffnungswinkel	Durchflußverhältnis
s	$\alpha$	$\Theta_T$	$\Theta_T$	s	$\alpha$	$\Theta_T$
2 cm	1,02°	0,0715	0,0689	5 cm	3,49°	0,1948
4 cm	2,05°	0,0943	0,0856	10 cm	6,99°	0,2890
6 cm	3,07°	0,1204	0,0950	15 cm	10,5°	0,3850
8 cm	4,09°	0,1426	0,1006	-	45°	0,8208
10 cm	5,12°	0,1752	0,1068	-	90°	1
12 cm	6,14°	0,2036	-			
14 cm	7,17°	0,2172	-			

### 7.3 Modellanpassung

Die Bestimmung der Koeffizienten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  in Gleichung 7.4 erfolgt durch eine Chi-Quadrat-Anpassung in der Form

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\dot{V}_{zu,i} - \dot{V}_{zu,R}(u_{v,i}; \Delta\vartheta_i; C_1; C_2; C_3)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (7.8)$$

Zielsetzung ist also die Ermittlung eines Koeffizienten-Satzes bei den Bedingungen

$$\frac{\partial \chi}{\partial C_1} = 0; \quad \frac{\partial \chi}{\partial C_2} = 0; \quad \frac{\partial \chi}{\partial C_3} = 0 \quad (7.9)$$

Für eine nichtlineare Beziehung, wie sie in Gleichung 7.8 vorliegt, erfolgt die Anpassung iterativ mit Hilfe der Levenberg-Marquard-Methode, wie sie in [Press]

beschrieben ist. Diese wird so modifiziert, daß eine Gleichung mit zwei unabhängigen Variablen berechnet werden kann.

Für die Anpassung werden jeweils 1h-Mittelwerte der gemessenen Zuluftvolumenströme, der vektoriellen Windgeschwindigkeit und der Temperaturdifferenzen innen/außen herangezogen.

Die Auswertung mit Gleichung 7.8 ergibt für einen Datensatz, der insgesamt 1900 h-Mittelwerte aller Kippstellungen und der Drehstellungen 5, 10 und 15 cm umfaßt, die Fitkoeffizienten:

$$C_1 = 0,0056 \quad C_2 = 0,0037 \text{ m}/(\text{s}^2 \text{ K}) \quad C_3 = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Die Öffnungsstellungen des Drehfensters von 45 und 90° können nicht berücksichtigt werden, da bei der Anpassung die Lösung nicht konvergiert. Die Ursachen dieser Problematik werden in Abschnitt 7.5 behandelt.

Mit den angegebenen Koeffizienten des Rechenmodells werden die Rechenwerte des Zuluftvolumenstroms für die genannten Fensterstellungen bestimmt und in Bild 7.4 über die gemessenen Werte aufgetragen.

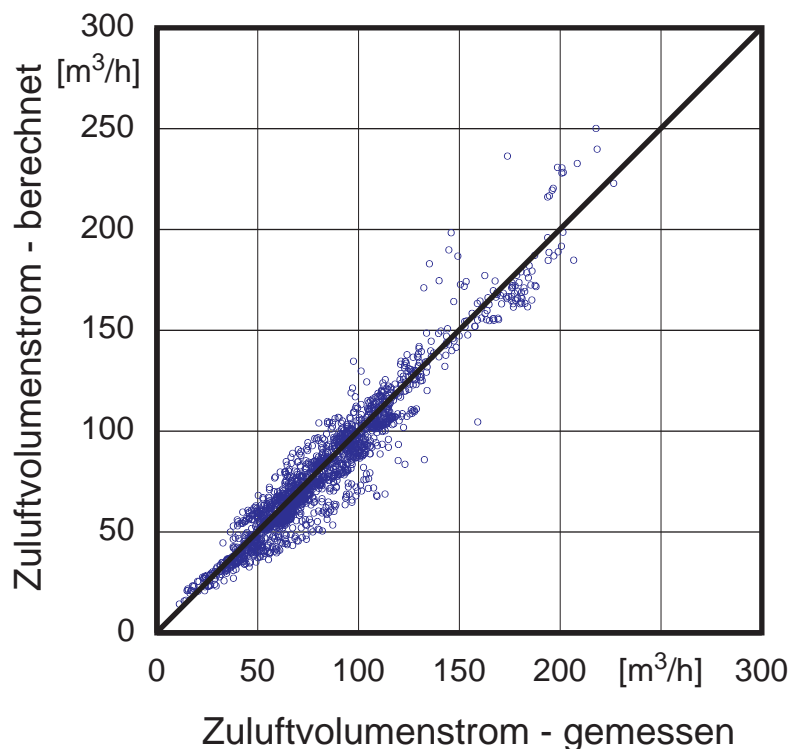


Bild 7.4: Vergleich der gemessenen und berechneten Zuluftvolumenströme für alle Kippstellungen und Drehstellungen von 5, 10 und 15 cm. Auswertung von 1h-Mittelwerten.

Bei einer mittleren Abweichung von  $2,15 \text{ m}^3/\text{h}$  und einer maximalen relativen Abweichung von  $+39\%$  bzw.  $-41\%$  beträgt die Standardabweichung  $9,95 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Für einen kleineren Zeitschritt, der aufgrund der Feldgrößenbeschränkung des Auswerteprogramms minimal  $0,2$  Stunden beträgt, führt die Anpassung zu den Fitkoeffizienten:

$$C_1 = 0,0052 \quad C_2 = 0,0039 \text{ m}/(\text{s}^2 \text{ K}) \quad C_3 = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Die Abweichungen zwischen den Koeffizientensätzen haben nur geringe Auswirkungen auf die Güte des Modells. Zieht man als Basis die 1h-Mittelwerte der Meteorologie heran und berechnet die Zuluftvolumenströme für alle zur Verfügung stehenden Daten, ergeben sich maximale Abweichungen aufgrund der unterschiedlichen Koeffizienten von  $+3,5\%$  bzw.  $-1,7\%$ . Die Standardabweichung liegt hier bei  $1,17 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Eine Plausibilitätsuntersuchung der gefundenen Koeffizienten kann zunächst mit Hilfe der in Kap. 6 aufgeführten Meßergebnisse erfolgen.

Die in Bild 6.2 geplotteten Meßdaten für das  $14 \text{ cm}$  geöffnete Kipfenster werden in Bild 7.5 den Rechenwerten gegenübergestellt. Das Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen Zuluftvolumenstrom und Temperaturdifferenz in einem weiten Bereich sehr gut. Eindeutig ist der insgesamt flachere Verlauf der Kurve zu erkennen, was dazu führt, daß der Luftaustausch bei hohen Temperaturdifferenzen (ohne Windeinwirkung) zu gering ermittelt wird. Die zu hoch bestimmten Werte bei kleinen Temperaturdifferenzen folgen aus dem Koeffizienten  $C_3$ , der allerdings die o.g. Größenordnung einnehmen muß, wenn die Überlagerung von Wind und Temperaturdifferenz betrachtet wird. In Bild 7.6 ist die Einwirkung der beiden Einflußgrößen auf den resultierenden Zuluftvolumenstrom beschrieben. Dargestellt sind die bereits in Bild 6.8 und 6.9 aufgeführten Meßdaten für die Bereiche der Temperaturdifferenz von  $2\text{-}4 \text{ K}$  und  $18\text{-}21 \text{ K}$ . Der Luftaustausch bei kleinen Windgeschwindigkeiten und Temperaturdifferenzen wird mit dem Turbulenzglied in Gleichung 7.4 gut repräsentiert. Eine ebenfalls gute Anpassung erfolgt bei hohen Temperaturen über den gesamten Bereich der Windgeschwindigkeit. Große Abweichungen resultieren bei primär windinduziertem Luftwechsel insbesondere bei Süd- und Ostanströmung. Die in Bild 6.8 eingetragenen Verläufe können aufgrund der starken Streuung nur Tendenzen aufzeigen. Der Versuch, einen funktionalen Zusammenhang zwischen Windrichtung und Zuluftvolumenstrom in das Modell zu integrieren, scheitert, da insgesamt zu wenig Meßdaten bei kleinen Temperaturdifferenzen mit gleichzeitig hoher Windgeschwindigkeit vorliegen.

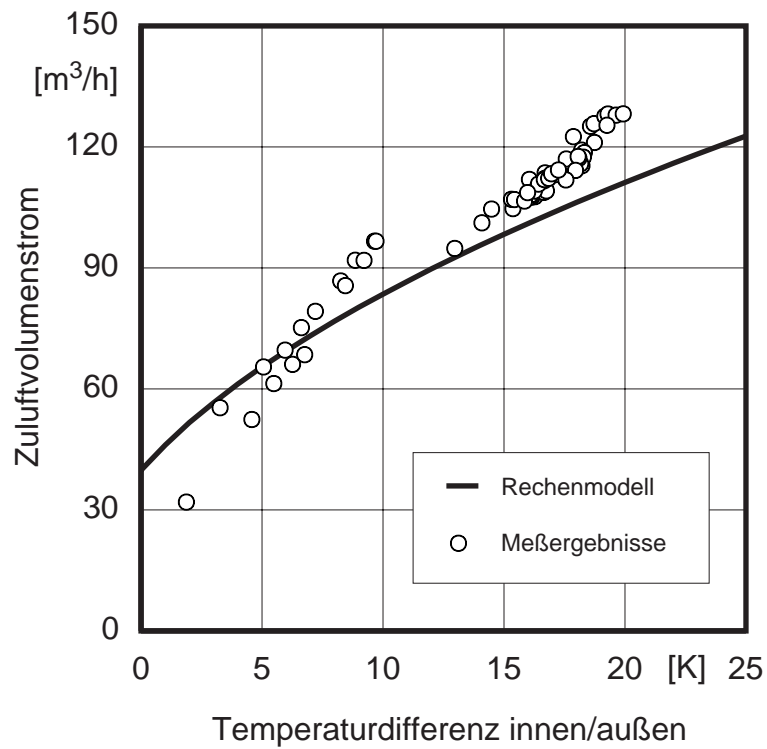


Bild 7.5: Darstellung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz innen/außen für Messung und Rechnung. 1h-Mittelwerte. Kippstellung der Fensters von 14 cm.

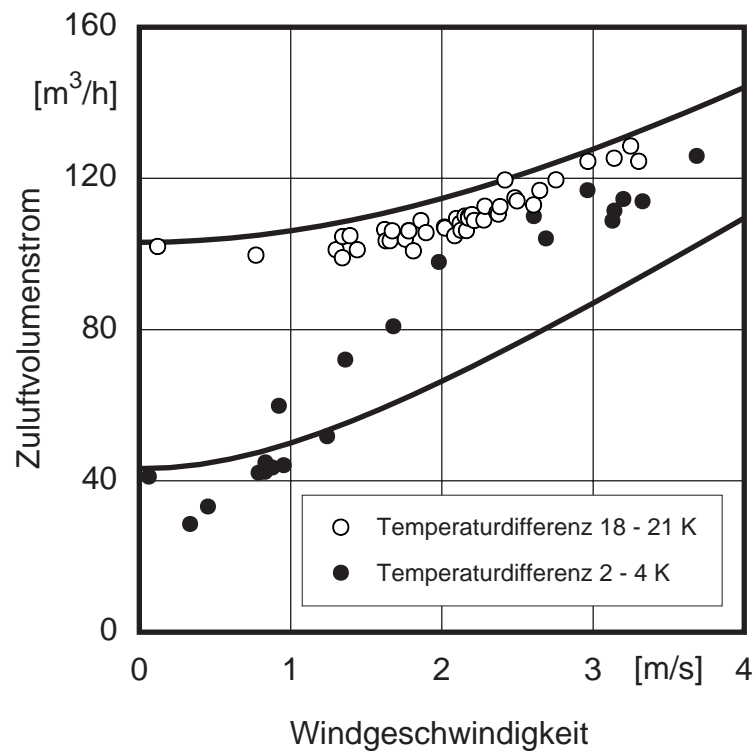


Bild 7.6: Darstellung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Messung und Rechnung. 1h-Mittelwerte. Kippstellung der Fensters von 12 cm.

## 7.4 Anwendung des Rechenmodells

Die Anwendung des Modells wird exemplarisch für den bereits in Kap. 6 aufgezeigten Tagesgang des Zuluftvolumenstroms dargestellt. Hierzu werden die aus den 1h-Mittelwerten berechneten Koeffizienten herangezogen. Bild 7.7 zeigt den zeitlichen Verlauf sowohl des gemessenen und berechneten Zuluftvolumenstroms als auch der meteorologischen Randbedingungen. Das Fenster ist in Kippstellung mit einer Öffnungsweite von 8 cm.

Der Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten bestätigt die zuvor getroffenen Aussagen hinsichtlich der Beschreibung von reinem temperatur- bzw. windinduziertem Luftwechsel und dem Überlagerungsbereich.

Wird die Berechnung des Zuluftvolumenstroms mit den in [Phaff] angegebenen Koeffizienten

$$C_1 = 0,001 \quad C_2 = 0,0035 \text{ m}/(\text{s}^2 \text{ K}) \quad C_3 = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

durchgeführt, ergibt sich der gestrichelt dargestellte Verlauf. Auch wenn die Übertragbarkeit der Literaturdaten aufgrund der beschriebene Problematik bezüglich der Definition des Durchflußverhältnisses nur bedingt gewährleistet ist, kann festgestellt werden, daß mit dem Wert  $C_1 = 0,001$  der Windeinfluß deutlich unterrepräsentiert wird.

Als Tagesmittel des Volumenstroms ergeben sich für den Beispieltag die folgenden Werte:

Messung:	51,8 m <sup>3</sup> /h
eigene Rechnung:	49,4 m <sup>3</sup> /h
Rechnung gem. [Phaff]:	39,2 m <sup>3</sup> /h

Als Schlußfolgerung aus den Vergleichen der gemessenen und berechneten Zuluftvolumenströme über ein Fenster mit kleinen Öffnungsweiten können nachstehende Aussagen getroffen werden:

- Der durch thermische Wirkung bedingte Luftaustausch wird mit dem Modellansatz gut beschrieben. Größere Abweichungen treten bei Temperaturdifferenzen in den Bereichen kleiner 5 K und größer 20 K auf.
- Der rein windinduzierte Luftwechsel wird infolge der im Rechenmodell nicht berücksichtigten Anströmrichtung nur ungenau erfaßt. Eine detaillierte Behandlung dieser Problematik kann nur auf der Basis von Modelluntersuchungen im Windkanal oder abgesicherter numerischer Strömungssimulationen



erfolgen. Weiterhin sind breit angelegte Felduntersuchungen zur Validierung der so gefundenen Ergebnisse erforderlich.

- Bei gleichzeitiger Einwirkung von Wind und Thermik findet sich eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten.
- Turbulenzeffekte können im Rahmen der Genauigkeit des Modells über einen Koeffizienten beschrieben werden.
- Die rechnerische Bestimmung des Durchflußverhältnisses aus der Geometrie der Fensteröffnung führt bei kleinen Öffnungsweiten zu großen Ungenauigkeiten.
- Die Übertragbarkeit des Modells ist begrenzt auf Gebäude, die in geometrischer Form und Lage den Bedingungen des Versuchsstandes in etwa entsprechen. Hierbei ist auch zu beachten, daß die für die Modellanpassung verwendete Windgeschwindigkeit eine lokal gemessene Größe darstellt. Ausführungen hinsichtlich der Umrechnung statistischer, meteorologischer Winddaten, z.B. aus Test-Referenz-Jahren, auf die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten sind in der Literaturstudie von [Liddament] zu finden.

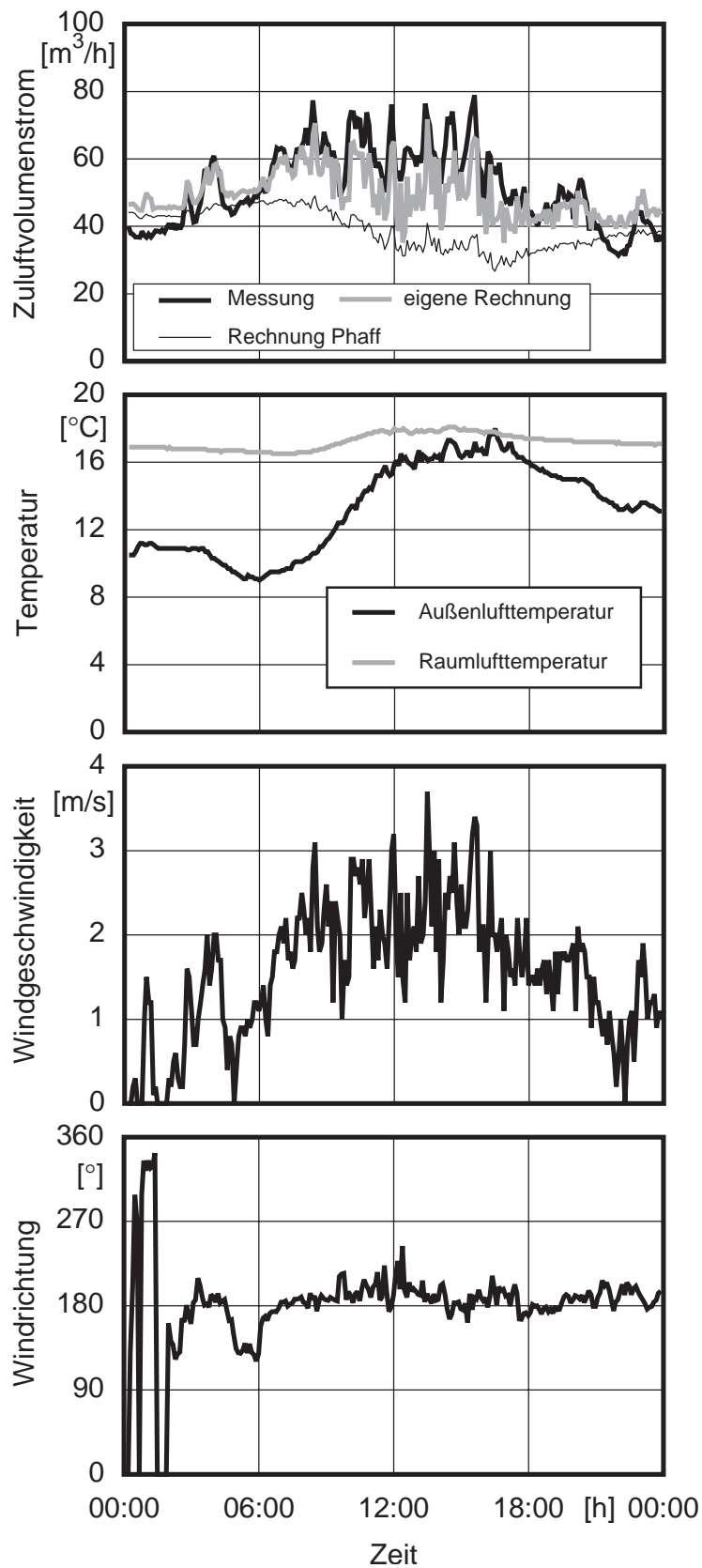


Bild 7.7: Zeitlicher Verlauf des Zuluftvolumenstroms, der Raum- und Außenlufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und -richtung. Kippstellung mit 8 cm Öffnungsweite. Messung am 11.9.1994.

## 7.5 Problematik bei großen Öffnungsweiten

Die Anpassung der Koeffizienten für das Rechenmodell gem. Gleichung 7.4 wird in Abschnitt 7.3 ausschließlich für die Kippstellungen und für die Drehstellungen bei 5, 10 und 15 cm Öffnungsweite vorgenommen. Bei Berücksichtigung aller Fensterstellungen, also auch der großen Öffnungswinkel von 45 und 90°, kann keine geschlossene Lösung gefunden werden, da die Anpassung mit dem Ansatz in Gleichung 7.8 nicht konvergiert.

Eine mögliche Ursache hierfür ist die von den Beobachtungen bei kleinen Öffnungsweiten abweichende Überlagerung von Wind- und Temperatureffekten. Wie die Darstellung der Meßergebnisse in Kapitel 6 zeigt, findet ein praktisch kontinuierliches Ansteigen des Zuluftvolumenstroms bei Vorhandensein einer wirksamen Temperaturdifferenz und zunehmender Windgeschwindigkeit statt. Bild 7.8 zeigt den zeitlichen Verlauf des Zuluftvolumenstroms, der Temperaturdifferenz innen/außen, der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung für eine 90°-Öffnung des Fensters. Der Zuluftvolumenstrom nimmt zunächst mit fallender Temperaturdifferenz ab und erreicht ein Minimum bei einer nahezu konstanten Temperaturdifferenz von ca. 9 K und auf rund 1,5 m/s angestiegener Windgeschwindigkeit. Bei weiterhin gleichbleibender Temperaturdifferenz und abnehmenden Wind steigt der Luftaustausch wieder an. Insgesamt lassen die geschilderten Verläufe den Schluß zu, daß sich bei gleichzeitigem Einwirken von Thermik und Wind die Effekte aufheben können. Diese Problematik wird auch in [van der Maas I] geschildert, allerdings nur qualitativ behandelt. Da für die großen Öffnungsweiten nicht ausreichend repräsentative Meßdaten zur Verfügung stehen, kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht weiter auf diesen Aspekt eingegangen werden.

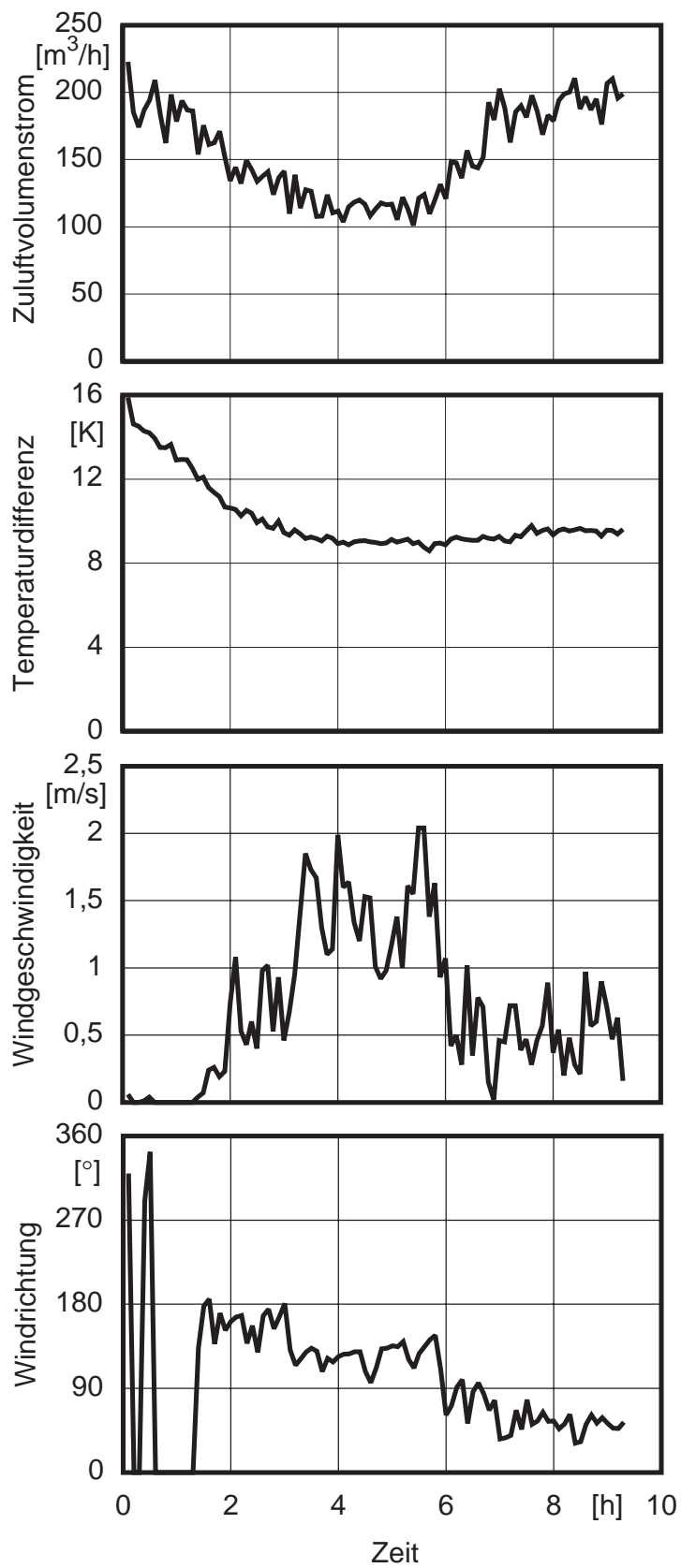


Bild 7.8: Zeitlicher Verlauf des Zuluftvolumenstroms, der Temperaturdifferenz Raum-/Außenluft, der Windgeschwindigkeit und -richtung. Drehstellung mit  $90^\circ$  Öffnungswinkel. Messung am 3.11.1994.

## 8. Luftwechsel und Lüftungswärmeverluste in der Heizzeit

Auf der Basis der meßtechnischen Untersuchungen und des abgeleiteten Lüftungsmodells können Betrachtungen hinsichtlich des Luftwechsels im jahreszeitlichen Verlauf angestellt werden. Hierzu werden im weiteren ausschließlich energetische Aspekte in der Heizzeit behandelt.

### 8.1 Festlegung der Randbedingungen

Die rechnerische Ermittlung sowohl des Luftwechsels als auch des damit verbundenen Lüftungswärmeverlustes erfordert zunächst die Festlegung der Randbedingungen.

#### Meteorologie

Es werden die meteorologischen Daten des Standortes der Versuchseinrichtung in Kassel in dem Zeitraum Juni 1994 bis Mai 1995 verwendet. Die vorliegenden Meßdaten werden als 1 h - Mittelwerte ausgewertet.

#### Betrachtungszeitraum

Als Heizzeit gilt die Anzahl der Heiztage, die sich aus den hier zugrunde gelegten Heizgrenztemperaturen von 15 bzw. 12 °C ergeben.

#### Nutzerverhalten

Hinsichtlich des Nutzerverhaltens werden drei Szenarien betrachtet. Einmal der extreme Fall, daß das Fenster über die gesamte Periode 24 h geöffnet ist, als Referenz für den maximal auftretenden Luftaustausch. Im zweiten Fall wird ein intermittierendes Lüftungsverhalten zu den Zeiten 7 - 9 Uhr, 11 - 14 Uhr und 18 - 20 Uhr betrachtet. Die aus diesen Zeiträumen resultierende mittlere Öffnungszeit von 8 h/d wird in Anlehnung an die Angaben von [Geiger II] gewählt. Die Festlegung der Öffnungszeiträume basiert auf der Annahme, daß zu Zeiten erhöhter Feuchte- bzw. CO<sub>2</sub>-Produktion infolge von Dusch- und Kochvorgängen bzw. häufiger Anwesenheit ein erhöhter Lüftungsbedarf auftritt. Für die zweite Variante wird weiterhin angenommen, daß das Fenster bei Außenlufttemperaturen  $\leq 0$  °C nicht geöffnet wird. Eine Einschränkung hinsichtlich des Einflusses der Windgeschwindigkeit auf das Öffnungsverhalten wird nicht getroffen, da in dem betrachteten Untersuchungszeitraum nur selten Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s vorliegen. Die Raumlufttemperatur wird mit 20 °C festgelegt. Die dritte Variation betrachtet die Öffnung des Fensters in den Nachtstunden von 20 - 6 Uhr. Hierbei wird die Raumlufttemperatur infolge Nachtabenkung vereinfacht mit 16 °C angesetzt.

## Fensterstellungen

Als Öffnungsvarianten werden Kippstellungen des Fensters mit 2 und 10 cm Öffnungsweite betrachtet. Für die Weite von 10 cm findet nochmals die Unterscheidung zwischen freier Öffnungsfläche und tiefer Einbau in der Laibung, "mit Rahmen" (vgl. Bild 5.6), statt. Bei geschlossenem Fenster wird ein Zuluftvolumenstrom von 3 m<sup>3</sup>/h zugrunde gelegt (vgl. Kap. 5.4).

## Lüftungswärmeverluste

Der Lüftungswärmeverlust wird mit dem stationären Ansatz

$$Q_L = \rho_L c_{p,L} \dot{V}_{zu} \Delta\vartheta \quad (8.1)$$

ermittelt. Der Zuluftvolumenstrom ergibt sich hierbei aus Gleichung 7.4.

Für die genannten Randbedingungen werden insgesamt 12 Fälle unterschieden, die detailliert dargestellt werden und sich aus drei Öffnungssituationen bei zwei verschiedenen Gradtagzahlen und den Nutzermustern bei dauerhaftem und intermittierendem Lüften ergeben. Für den Fall der nächtlichen Lüftung wird nur der auftretende Luftwechsel betrachtet.

## **8.2 Luftwechsel**

Die Ergebnisse hinsichtlich des resultierenden Zuluftvolumenstroms sind in den Bildern 8.1 - 8.4 aufgetragen. Es ist jeweils die relative Häufigkeit des stündlichen Zuluftvolumenstroms für die o. g. Fälle abgebildet. Aus den Darstellungen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Bei einer Heizgrenztemperatur von 15 °C und permanenter Kippöffnung der Fenster treten Zuluftvolumenströme von ca. 33 bis 81 m<sup>3</sup>/h im Mittel der Heizzeit auf (vgl. Bild 8.1). Die Werte unterscheiden sich je nach Öffnungsstellung. Die angegebenen Luftwechsel von 0,56 bis 1,38 h<sup>-1</sup> beziehen sich auf den betrachteten Versuchsraum mit einem Raumvolumen von 58,5 m<sup>3</sup>. Die Anzahl der Heiztage bei der Heizgrenztemperatur von 15 °C beträgt 269 d.

Bei einer Kippstellung des Fensters von 2 cm beträgt der Luftaustausch mit einer Häufigkeit von ca. 89 % zwischen 20 und 40 m<sup>3</sup>/h. Für größere Öffnungsweiten resultiert ein breiterer Bereich des Zuluftvolumenstroms, der bei 10 cm Kippweite zwischen ca. 50 und 110 m<sup>3</sup>/h liegt.

Wird bei gleicher Heizgrenztemperatur ein intermittierendes Fensteröffnen zugrunde gelegt, ergeben sich gem. Bild 8.2 mittlere Zuluftvolumenströme von

ca. 12 bis 26 m<sup>3</sup>/h, die mit einem Luftwechsel von 0,21 bis 0,45 h<sup>-1</sup> korrespondieren. Beachtet man, daß hierbei eine Gesamtöffnungszeit von 8 h vorliegt und Zuluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel jeweils ca. 1/3 der permanenten Öffnungsstellung betragen, kann festgestellt werden, daß der auf die Öffnungszeit bezogene mittlere Luftaustausch nahezu gleich ist.

- In der Heizzeit, die bei einer Heizgrenztemperatur von 12 °C eine Dauer von 218 Tagen aufweist, steigt der mittlere Luftwechsel bei der jeweiligen Öffnungsstellung und permanenter Lüftung gegenüber dem Fall der Heizgrenztemperatur von 15 °C um rund 5 % an (Bilder 8.3 und 8.4). Dies liegt in dem insgesamt niedrigeren Außenlufttemperaturniveau, das dieser Betrachtung zugrunde liegt, begründet. Bei intermittierender Lüftung am Tage beträgt die Zunahme ca. 3,5 %. Die relativen Häufigkeiten in den Bildern 8.3 und 8.4 weisen gegenüber den Auftragungen in den Bildern 8.1 und 8.2 größere Spitzen bei annähernd gleicher Bandbreite der auftretenden Zuluftvolumenströme auf.

Die zuvor geschilderten Ergebnisse hinsichtlich des mittleren Luftwechsels über die Heizzeit sind in den Bildern 8.5 und 8.6 nochmals aufgeführt, wobei zusätzlich die Werte für die Nachtlüftung aufgetragen sind. Bemerkenswert ist, daß bei gleicher Öffnungszeit für die intermittierende Fensterstellung und nächtliches Lüften praktisch gleiche Luftwechsel auftreten. Bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C, also ohne Nachtabsenkung, nimmt der Luftaustausch in den Nachtstunden aufgrund der tieferen Außenlufttemperaturen gegenüber den aufgeführten Werten um ca. 10 % zu.

In Bild 8.7 ist der mittlere Luftwechsel über die Heizzeit, hier zur besseren Unterscheidung als Gesamtluftwechsel (mittlerer Luftwechsel infolge von Fenster- und Fugenlüftung) bezeichnet, bei einer Heizgrenztemperatur von 12 °C aufgetragen. Als Randbedingungen gelten die Kippstellung von 10 cm und intermittierendes Fensteröffnen. Die einzelnen Balken zeigen den Einfluß des Infiltrationsluftwechsels, wenn Werte zwischen 0,05 und 0,2 h<sup>-1</sup> berücksichtigt werden. Der Wert von 0,05 h<sup>-1</sup> basiert auf Meßergebnissen in dem Versuchsraum und ist als repräsentativ für einen praktisch dichten Raum anzusehen (vergl. Kap. 5.4). Der natürliche Luftwechsel von 0,2 h<sup>-1</sup> ist als Mittelwert für heute übliche Bauausführungen der Arbeit von [Hausladen] entnommen. Vergleicht man die aufgeführten Werte so läßt sich feststellen, daß durch eine Reduktion des Luftwechsels infolge Infiltration um 0,1 h<sup>-1</sup> durch Realisierung einer insgesamt dichteren Gebäudehülle bei den zugrunde gelegten Lüftungsgepflogenheiten der mittlere Gesamtluftwechsel um ca. 0,07 h<sup>-1</sup> abnimmt.

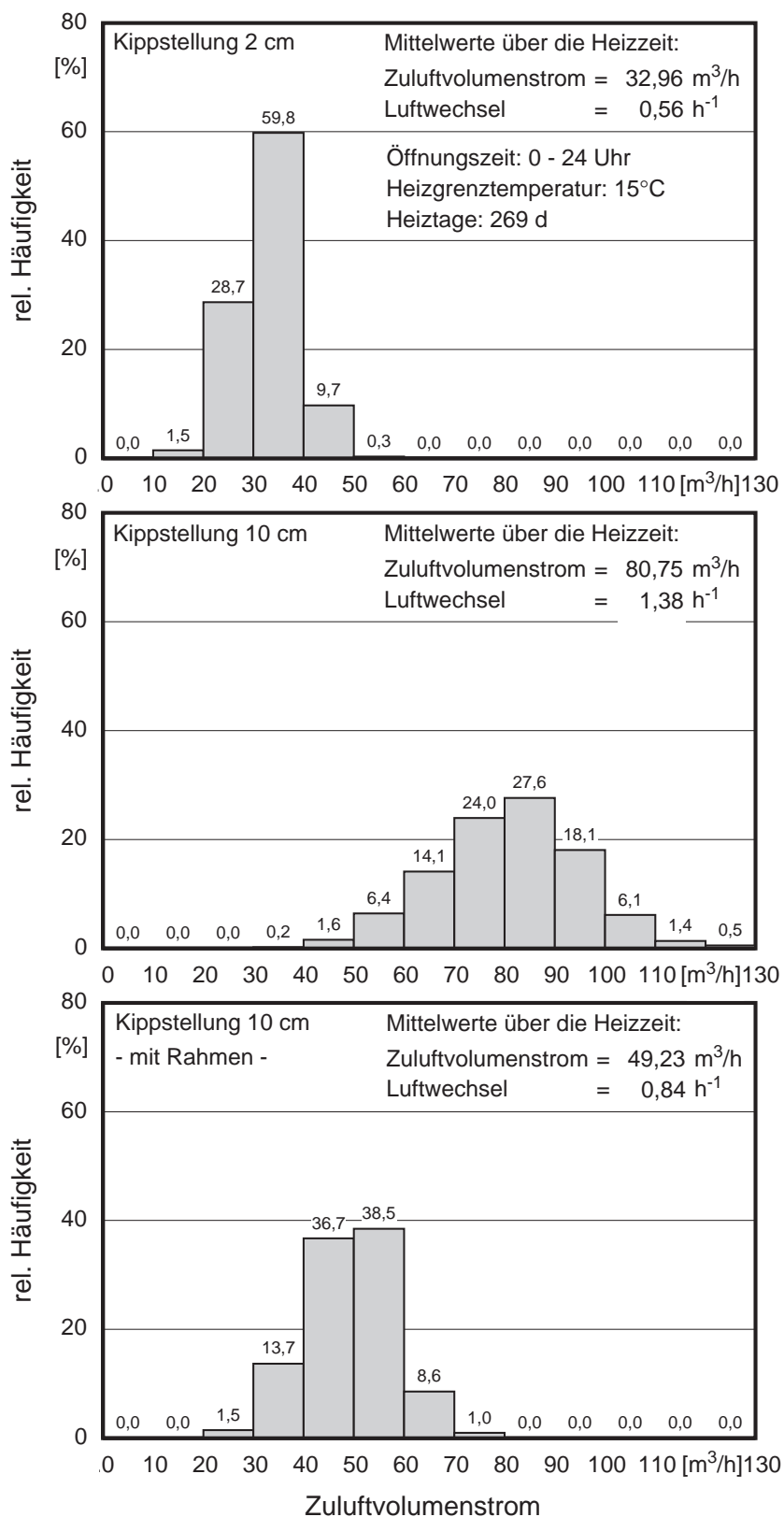


Bild 8.1: Relative Häufigkeit des Zuluftvolumenstroms während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 15°C und permanenter Lüftung für drei Kippstellungen. Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.



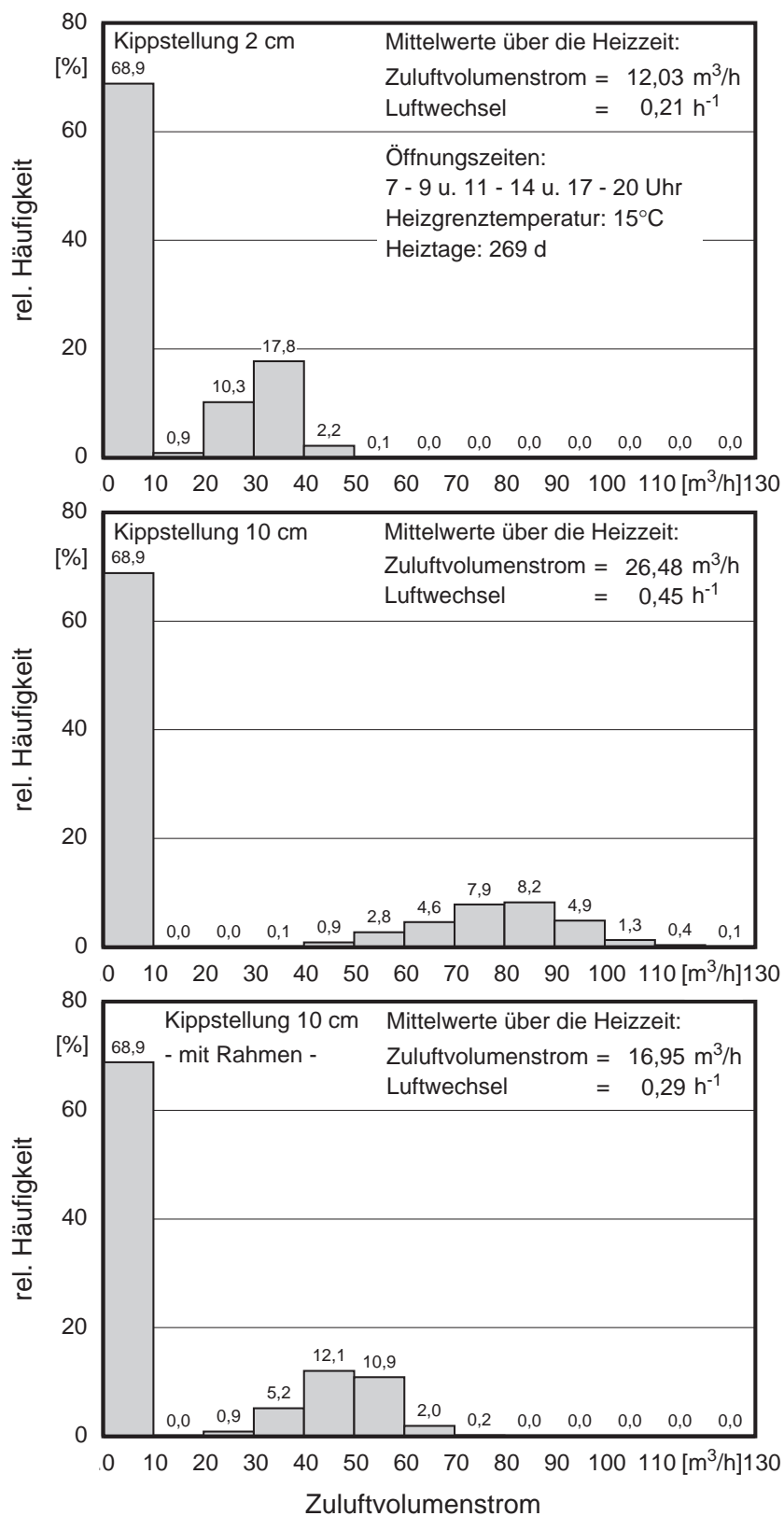


Bild 8.2: Relative Häufigkeit des Zuluftvolumenstroms während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 15°C und intermittierender Lüftung für drei Kippstellungen. Die Öffnung des Fensters erfolgt nur bei Außenlufttemperaturen  $\geq 0^\circ\text{C}$ . Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

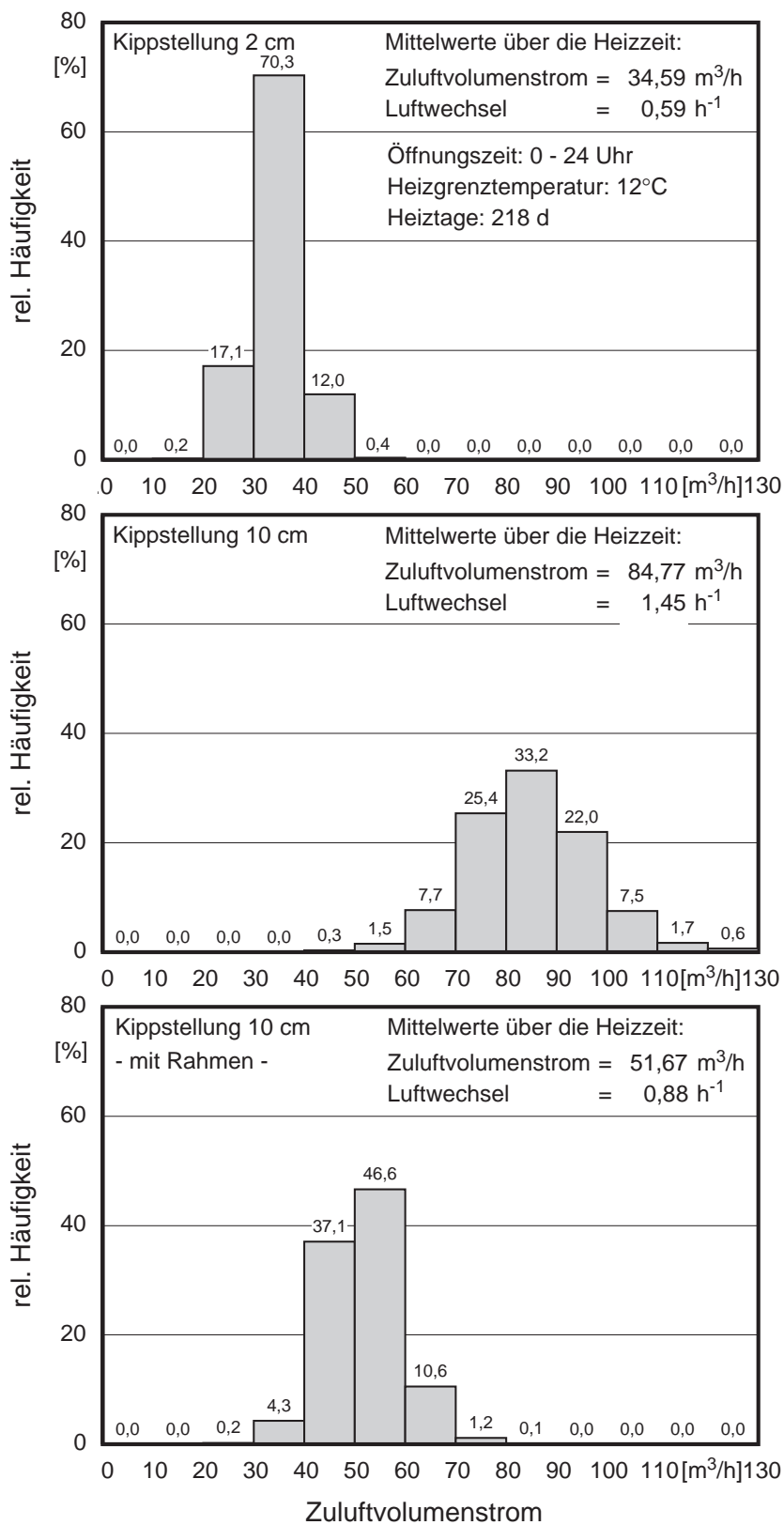


Bild 8.3: Relative Häufigkeit des Zuluftvolumenstroms während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 12°C und permanenter Lüftung für drei Kippstellungen. Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

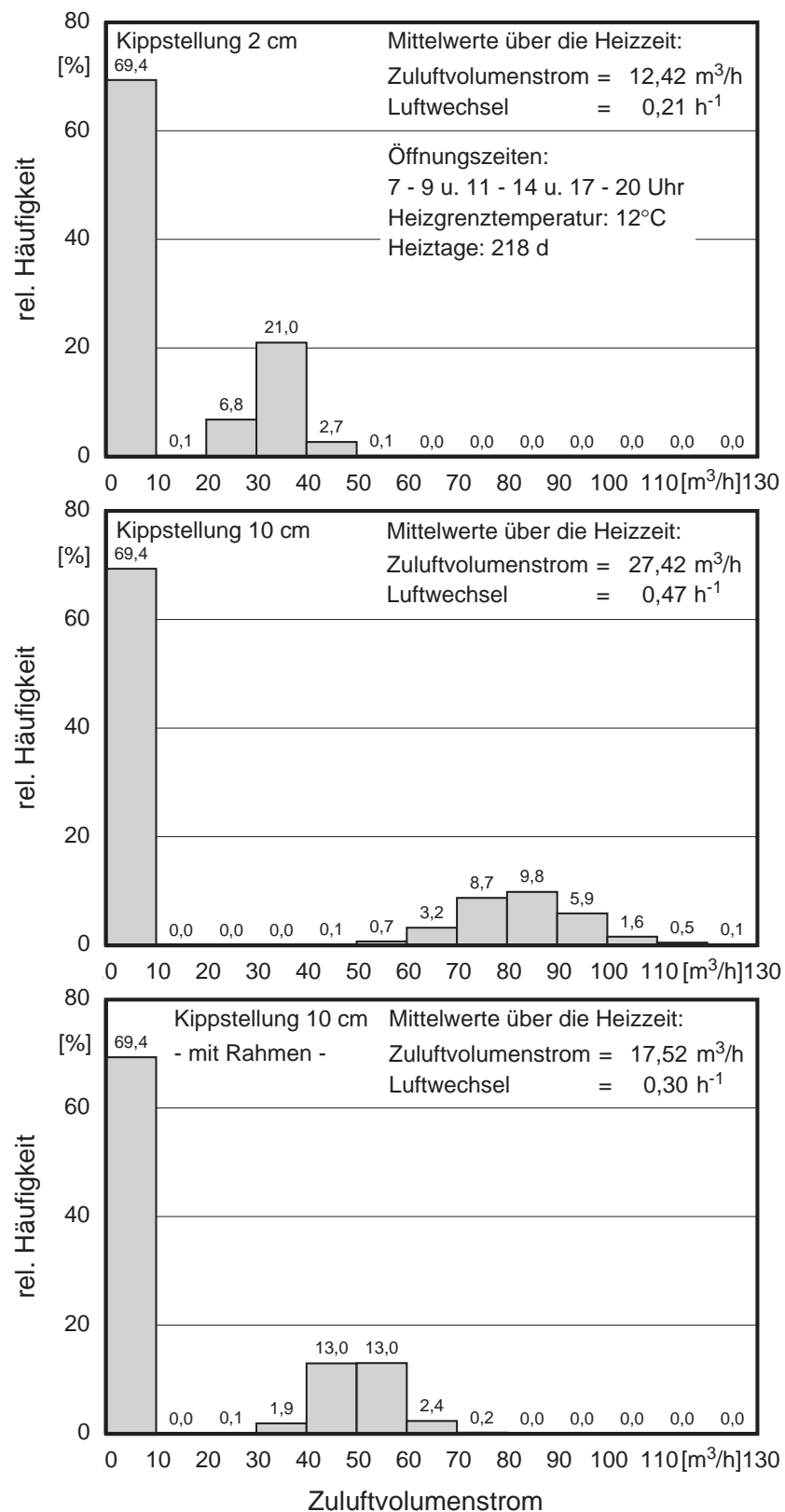


Bild 8.4: Relative Häufigkeit des Zuluftvolumenstroms während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 12°C und intermittierender Lüftung für drei Kippstellungen. Die Öffnung des Fensters erfolgt nur bei Außenlufttemperaturen  $\geq 0^\circ\text{C}$ . Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

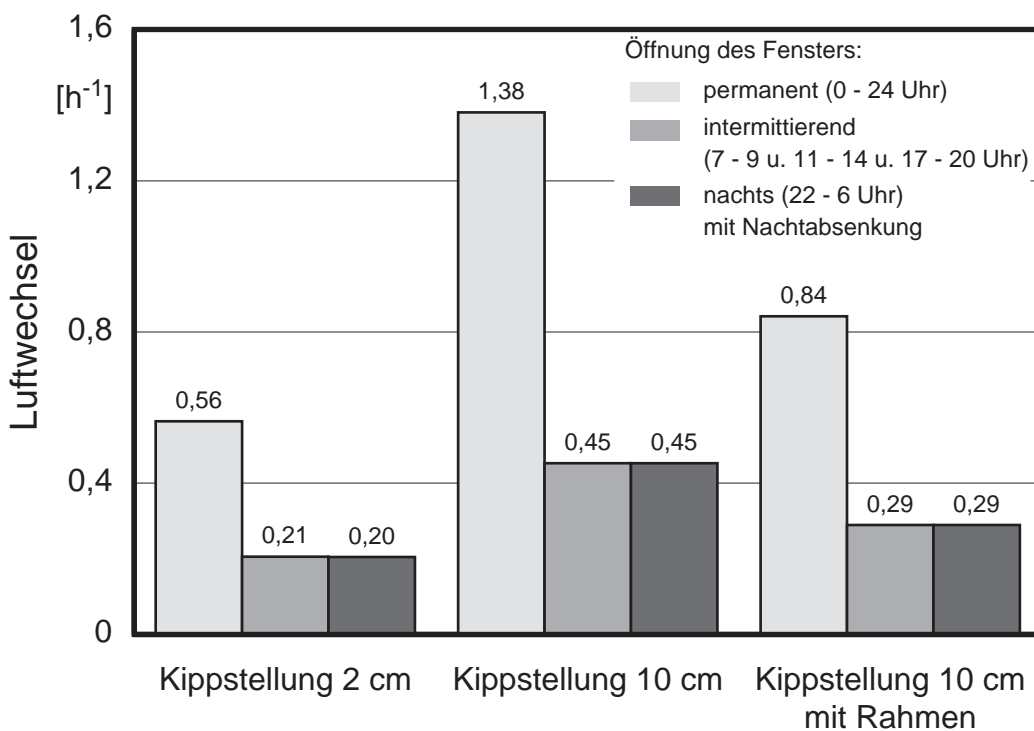


Bild 8.5: Mittelwerte des Luftwechsels über die Heizzeit mit 15°C Heizgrenztemperatur für drei Kippstellungen und Variation der Fensteröffnungszeiten. Bei Nachtabsenkung beträgt die Raumtemperatur 16°C. Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

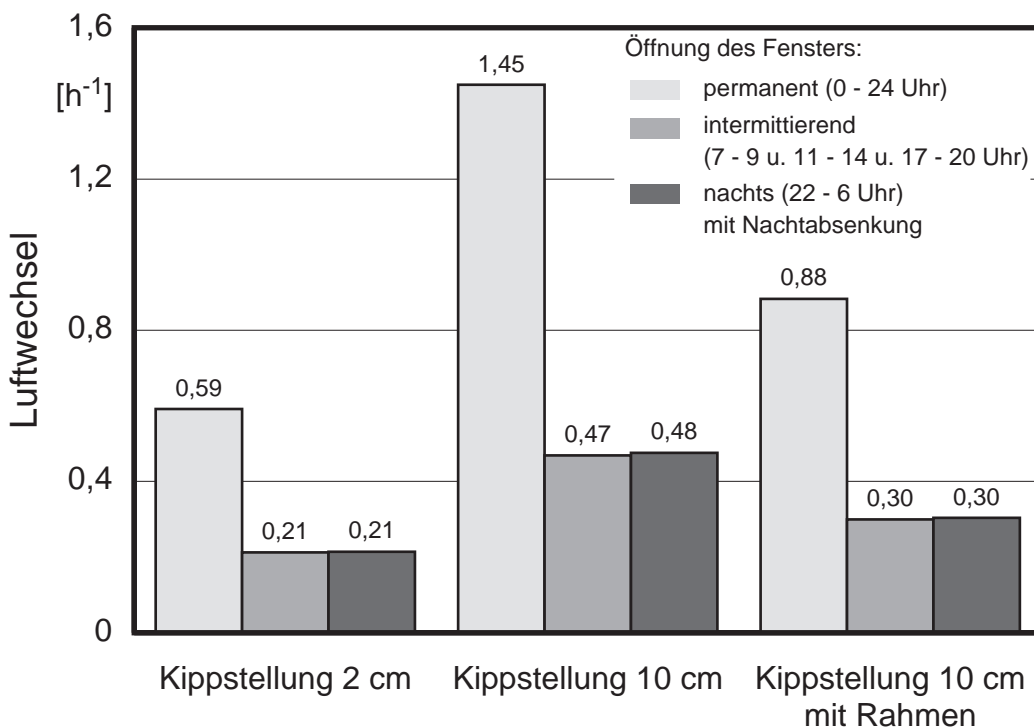


Bild 8.6: Mittelwerte des Luftwechsels über die Heizzeit mit 12°C Heizgrenztemperatur für drei Kippstellungen und Variation der Fensteröffnungszeiten. Bei Nachtabsenkung beträgt die Raumtemperatur 16°C. Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

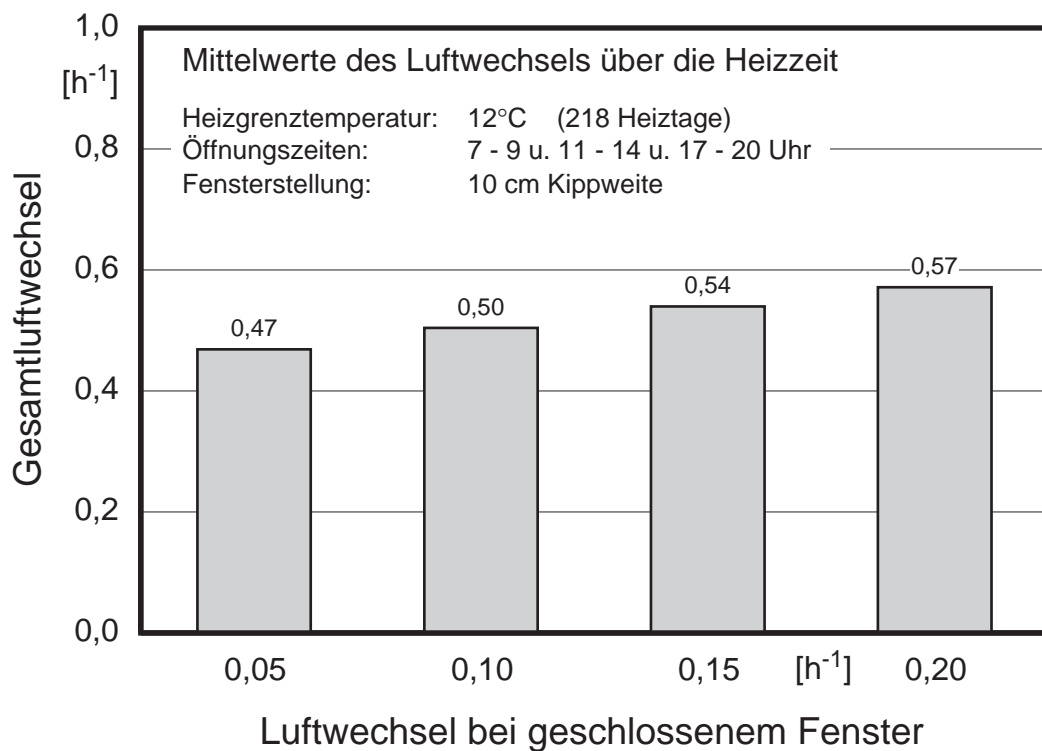


Bild 8.7: Gesamtluftwechsel bzw. Mittelwerte des Luftwechsels über die Heizzeit in Abhängigkeit des Luftwechsels bei geschlossenem Fenster. Intermittierende Lüftung, 10 cm Öffnungsweite in Kippstellung und Heizgrenztemperatur von 12°C. Das zugrunde gelegte Raumvolumen beträgt 58,5 m<sup>3</sup>.

## 8.2 Lüftungswärmeverlust

Die relativen Häufigkeiten des Lüftungswärmeverlustes bei den zuvor genannten Randbedingungen sind in den Bildern 8.8 und 8.9 aufgetragen und führen zu folgenden Feststellungen:

- Bei permanenter Öffnung des Fensters und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C beträgt der Lüftungswärmeverlust zwischen 0,15 und 0,38 kW, je nach Öffnungssituation. Für die Mittelwerte des jährlichen Lüftungswärmeverlustes über die Heizzeit bedeutet dies Werte zwischen 999 und 2448 kWh/a. Ebenso wie bei dem zuvor beschriebenen Verhältnis zwischen permanenter und intermittierender Fensteröffnung hinsichtlich des resultierenden Zuluftvolumenstroms wird der Lüftungswärmeverlust bei achtstündiger Öffnungsdauer zu Tagstunden auf ca. 1/3 reduziert.

Die Gradtagzahl beträgt bei der Heizgrenztemperatur von 15 °C für den vorliegenden Auswertzeitraum 3515 Kd.

- Die Betrachtungen für die Heizgrenztemperatur von 12 °C, die in den Bildern 8.10 und 8.11 wiedergegeben sind, zeigen, daß der Lüftungswärmeverlust gegenüber dem zuvor behandelten Fall um ca. 13 % zunimmt. Dies geschieht wiederum infolge des insgesamt niedrigeren Außenlufttemperaturniveaus. Der jährliche Lüftungswärmeverlust wird aufgrund der kleineren Gradtagzahl von 3175 Kd um ca. 7,5 % reduziert.

In den Tabellen 8.1 und 8.2 sind die Untersuchungsergebnisse nochmals zusammengefaßt.

Die Ergebnisse aus den Abschnitten 8.2 und 8.3 können für eine Reihe von Betrachtungen herangezogen werden, von denen eine als besonders wichtig angesehen wird: die Behandlung des Lüftungswärmebedarfs in stationären Berechnungsverfahren, wie z. B. der Wärmeschutzverordnung [WSchVO] und [DIN 4108]. Es stellt sich hierbei die Frage, welchen Einfluß die Dichtheit des Gebäudes auf den anzusetzenden rechnerischen Luftwechsel hat.

Wird als Basisfall ein 0,8-facher Luftwechsel betrachtet, wie er bei den genannten Verfahren zugrunde gelegt ist, so steigt dieser Luftwechsel um rund 5 % bei Absenkung der Heizgrenztemperatur von 15 auf 12°C und führt zu einem Wert von 0,84 h<sup>-1</sup>. Gelingt es durch verschärfte Dichtheitsanforderungen den Infiltrationsluftwechsel um 0,15 h<sup>-1</sup> zu senken, würde dies einen rechnerisch in Ansatz zu bringenden Luftwechsel von etwa 0,74 h<sup>-1</sup> für o. g. Rechenansätze bedeuten (vergl. Bild 8.7). Derzeit ist allerdings noch nicht geklärt, wie der tatsächlich auftretende natürliche Luftwechsel mit höherer Dichtheit der Gebäudehülle abnimmt.

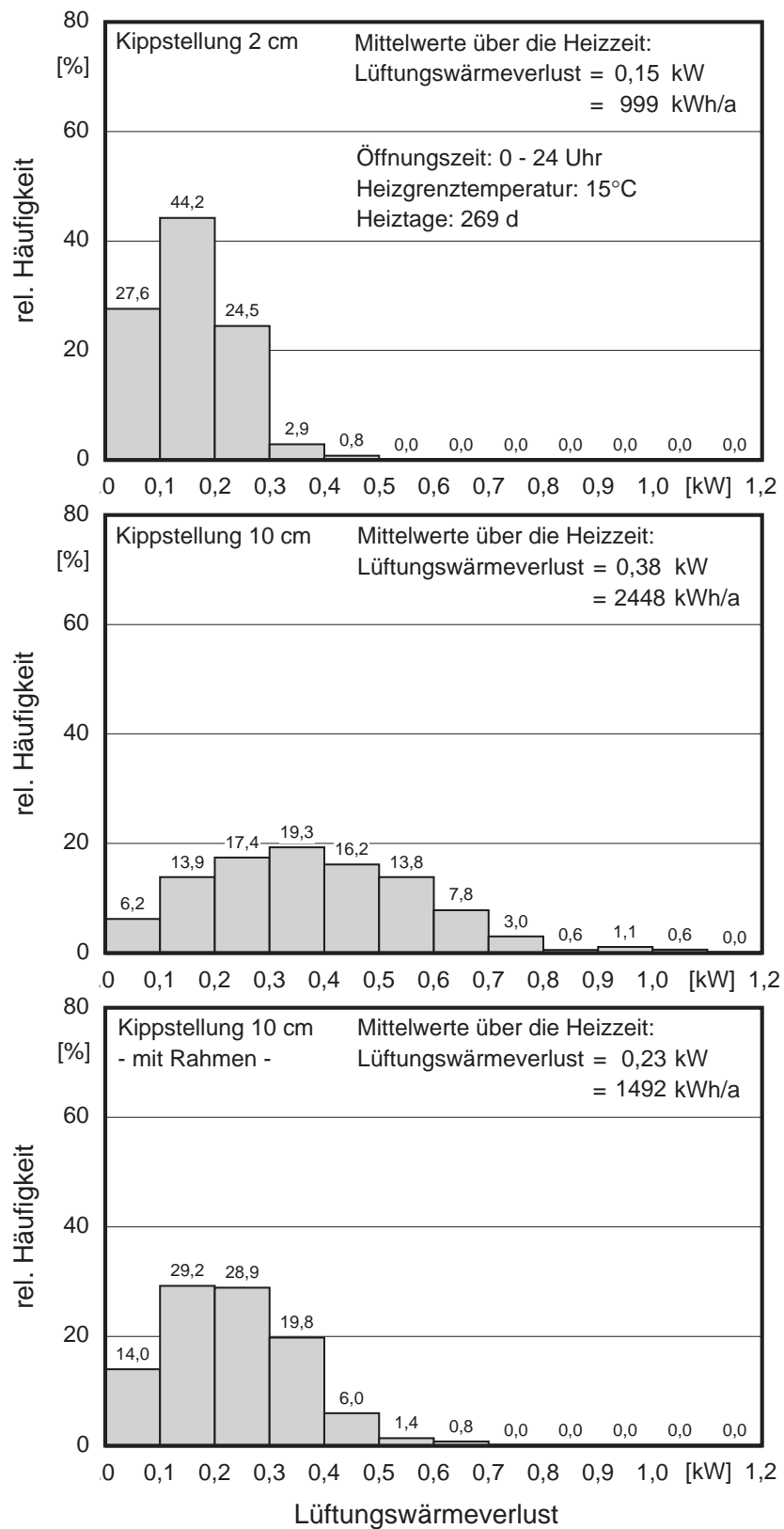


Bild 8.8: Relative Häufigkeit des Lüftungswärmeverlustes während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 15°C und permanenter Lüftung für drei Kippstellungen.

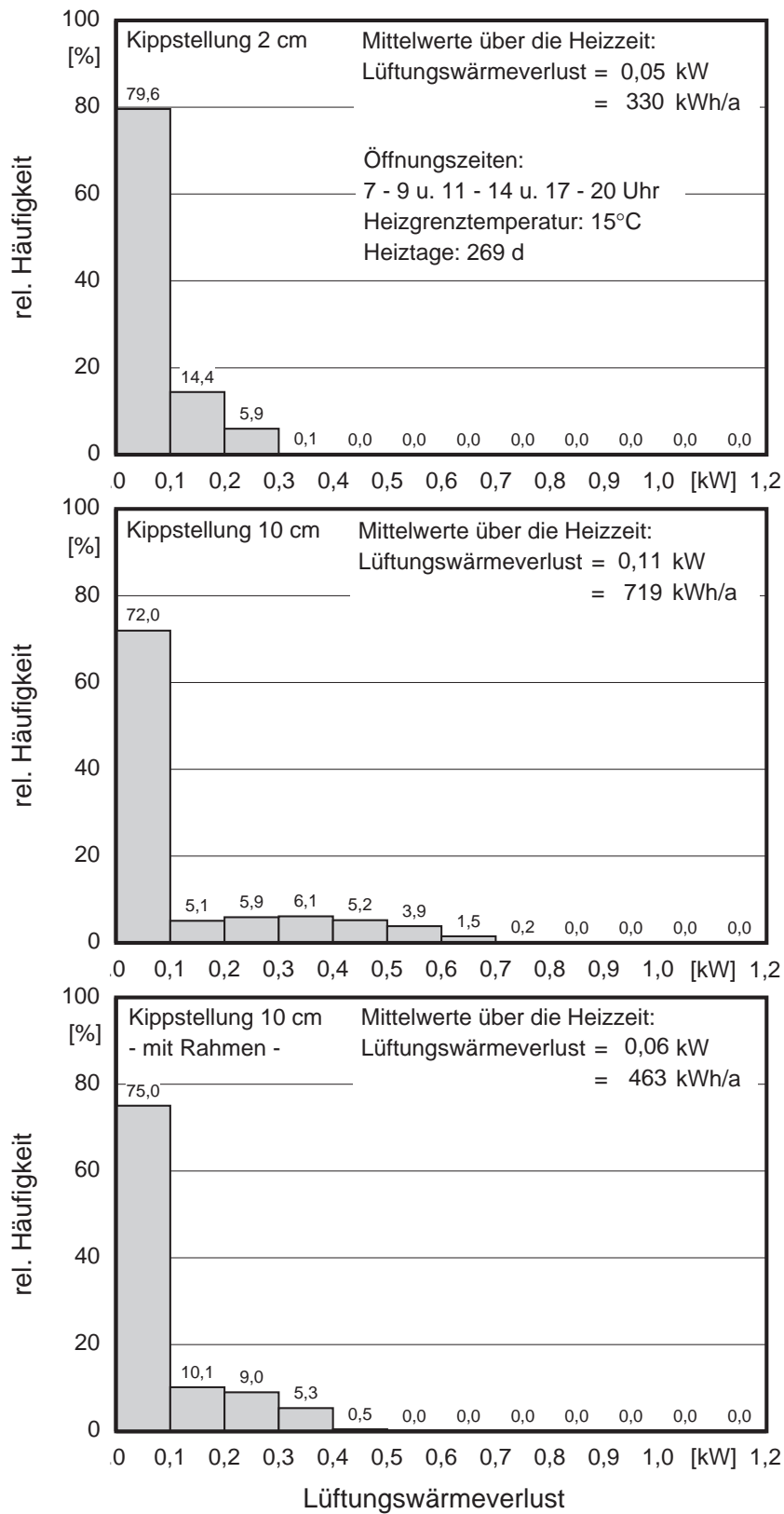


Bild 8.9: Relative Häufigkeit des Lüftungswärmeverlustes während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 15°C und intermittierender Lüftung für drei Kippstellungen. Die Öffnung des Fensters erfolgt nur bei Außenlufttemperaturen  $\geq 0^\circ\text{C}$ .



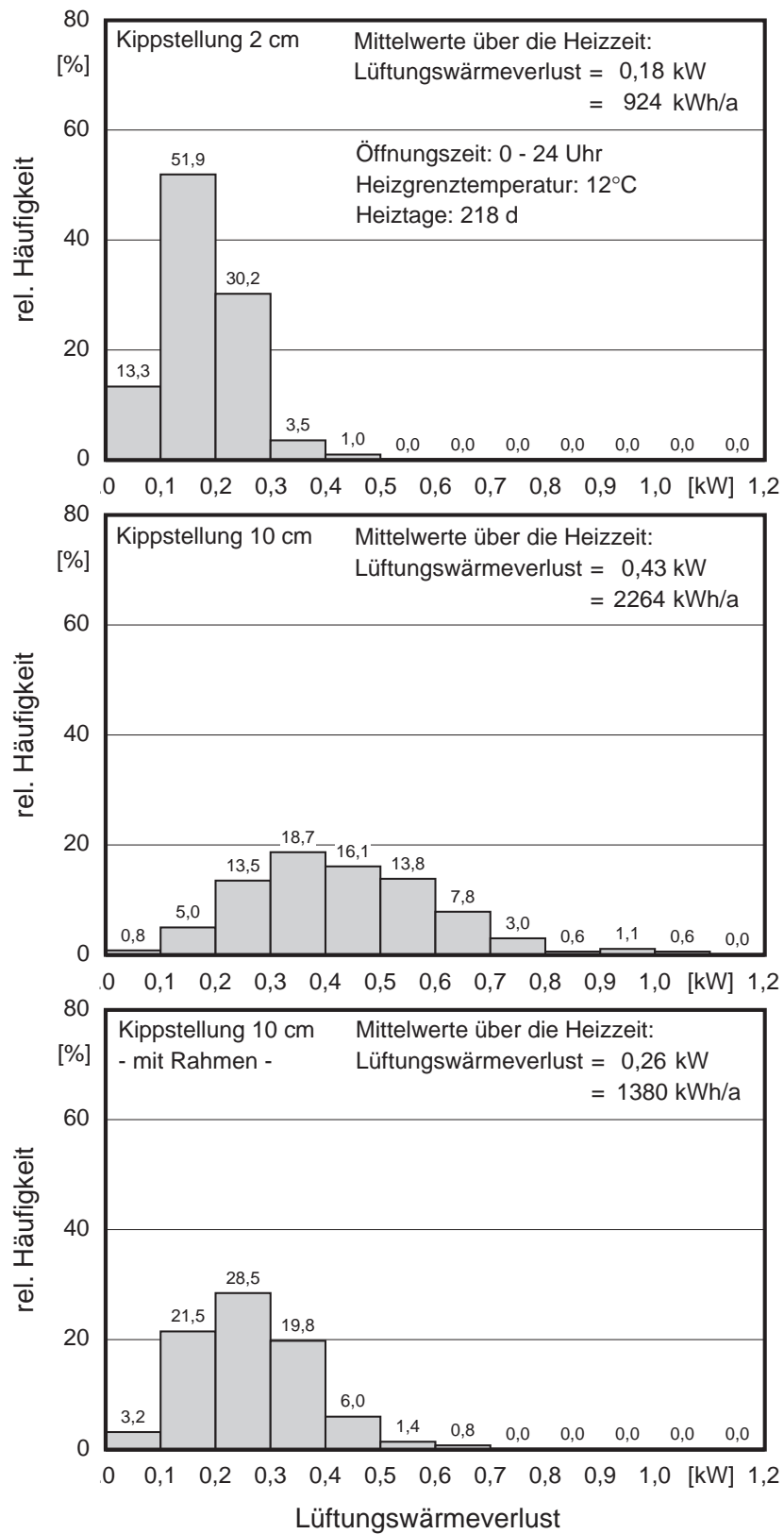


Bild 8.10: Relative Häufigkeit des Lüftungswärmeverlustes während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 12°C und permanenter Lüftung für drei Kippstellungen.

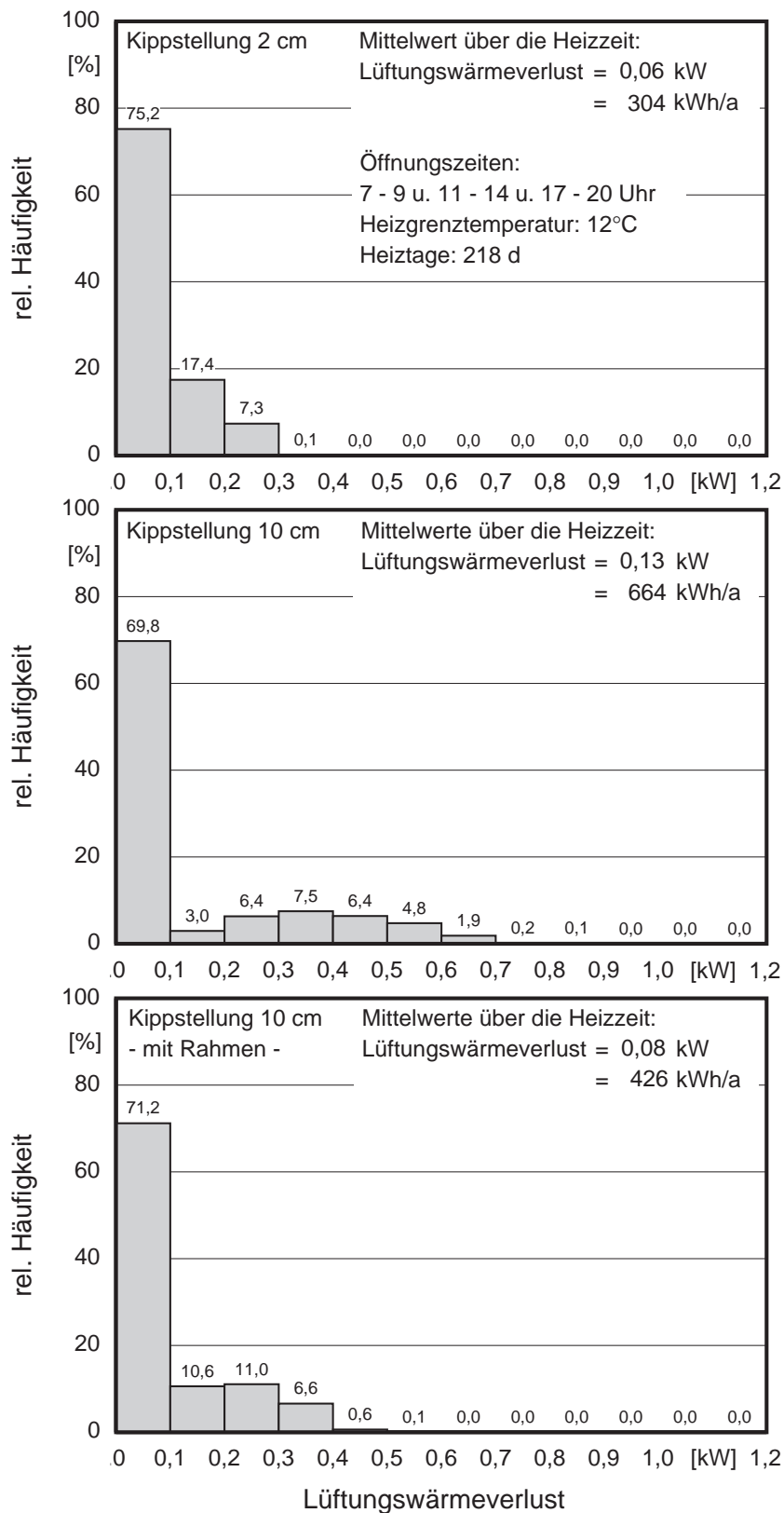


Bild 8.11: Relative Häufigkeit des Lüftungswärmeverlustes während der Heizzeit bei einer Heizgrenztemperatur von 12°C und intermittierender Lüftung für drei Kippstellungen. Die Öffnung des Fensters erfolgt nur bei Außenlufttemperaturen  $\geq 0^\circ\text{C}$ .

Tabelle 8.1: Mittelwerte des Zuluftvolumenstroms und des Luftwechsels über die Heizzeit für Heizgrenztemperaturen von 12 und 15°C und permanenter sowie intermittierender Öffnung des Kippfensters mit je 3 Öffnungsweiten.

Öffnungsweite (Kippstellung)	Heizgrenz- 15 °C temperatur				Heizgrenz- 12 °C temperatur			
	0 - 24 Uhr		7 - 9 u. 11 - 14 u. 17 - 20 Uhr		0 - 24 Uhr		7 - 9 u. 11 - 14 u. 17 - 20 Uhr	
	$\dot{V}_{zu}$ [m <sup>3</sup> /h]	n [h <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_{zu}$ [m <sup>3</sup> /h]	n [h <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_{zu}$ [m <sup>3</sup> /h]	n [h <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_{zu}$ [m <sup>3</sup> /h]	n [h <sup>-1</sup> ]
2 cm	32,96	0,56	12,03	0,21	34,59	0,59	12,42	0,21
10 cm	80,75	1,38	26,48	0,45	84,77	1,45	27,42	0,47
10 cm mit Rahmen	49,23	0,84	16,95	0,29	51,67	0,88	17,52	0,30

Tabelle 8.2: Mittelwerte des Lüftungswärmeverlustes über die Heizzeit für Heizgrenztemperaturen von 12 und 15°C und permanenter sowie intermittierender Öffnung des Kippfensters mit je 3 Öffnungsweiten.

Öffnungsweite (Kippstellung)	Heizgrenz- 15 °C temperatur				Heizgrenz- 12 °C temperatur			
	0 - 24 Uhr		7 - 9 u. 11 - 14 u. 17 - 20 Uhr		0 - 24 Uhr		7 - 9 u. 11 - 14 u. 17 - 20 Uhr	
	$Q_L$ [kW]	$Q_{L,a}$ [kWh/a]	$Q_L$ [kW]	$Q_{L,a}$ [kWh/a]	$Q_L$ [kW]	$Q_{L,a}$ [kWh/a]	$Q_L$ [kW]	$Q_{L,a}$ [kWh/a]
2 cm	0,15	999	0,05	330	0,18	924	0,05	304
10 cm	0,38	2448	0,11	719	0,43	2264	0,13	664
10 cm mit Rahmen	0,23	1492	0,07	463	0,26	1380	0,08	426

## 9. Zusammenfassung

Die freie Lüftung über Fenster, Türen und sonstige Öffnungen in der Gebäudehülle stellt heutzutage die am weitesten verbreitete Form der Lüftung dar. Über den Luftaustausch, der sich bei dieser Lüftungsart raum- oder gebäudeweise einstellt, existieren derzeit weder abgesicherte Erkenntnisse hinsichtlich des jahreszeitlichen Verlaufs noch der resultierenden mittleren Werte einer Periode. Die Problematik der Beschreibung auftretender Luftwechsel wird deutlich, wenn man die komplexen beeinflussenden Parameter betrachtet. Hierbei sind im wesentlichen die Gebäudeform und -lage, die meteorologischen Verhältnisse am jeweiligen Standort und das Nutzerverhalten zu nennen. Die Kenntnis über das Zusammenwirken dieser Einflußgrößen ist von ausschlaggebender Bedeutung für die sinnvolle Planung und Ausführung von Gebäuden im Hinblick auf energiesparendes Bauen sowie behagliches und gesundes Wohnen bzw. Arbeiten und nicht zuletzt für das vernünftig angepaßte Verhalten der Nutzer.

Grundlagen der vorliegenden Arbeit bilden meßtechnische Untersuchungen zur Ermittlung des Luftwechsels unter natürlichen meteorologischen Randbedingungen in einem Versuchsgebäude am Standort Kassel im Zeitraum September 1994 bis April 1995. Als Meßverfahren wird die Tracergastechnik eingesetzt, deren prinzipielle Anwendungsmöglichkeiten und Methoden umfassend vorgestellt werden.

Auf der Basis einer mathematisch - physikalischen Modellbildung werden Auswerteverfahren für die Konstant-Konzentrations- und Konzentrationsabfall-Methode aufgezeigt.

Die detaillierte Darstellung des Versuchsaufbaus umfaßt die Dokumentation des Tracergasmeßsystems und der Meteorologiestation. Ein Schwerpunkt wird auf die Auslegung des Regelungssystems gelegt, welches mit dem Einsatz eines PI-Reglers ein sehr gutes Regelverhalten aufweist. Referenzmessungen mit unterschiedlichen Meßverfahren und Tracergasmethoden zeigen die Gültigkeit der zugrunde gelegten Modellbildung und die Einhaltung des geforderten Durchmischungskriteriums.

Als Meßvarianten werden unterschiedliche Öffnungsstellungen eines Dreh- bzw. Kippflügelfensters bei freier Öffnungsfläche und tiefer Anordnung des Kippfensters in der Laibung betrachtet.

Die Meßergebnisse für den thermisch bedingten Luftwechsel lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Anordnung des Heizkörpers direkt unterhalb des Fensters führt zu einer Verringerung des Luftaustausches.
- Infolge Diffusion und lokaler Turbulenzen erfolgt ein Luftwechsel auch ohne eine wirksame Temperaturdifferenz.
- Bei gleicher Öffnungsfläche von Kipp- und Drehfenster tritt bei der Kippstellung ein nur 0,6-facher Luftaustausch gegenüber der Drehstellung auf.
- Ist das Fenster tief in der Laibung eingebaut, wird der Luftdurchgang gegenüber einer an der Innenseite der Außenwand bündigen Anordnung bei größeren Kippweiten um ca. 50 % vermindert.

Aus der Betrachtung der Meßergebnisse für den windinduzierten Zuluftvolumenstrom folgt, daß die Abhängigkeit von der Anströmrichtung relativ gering ist. Höhere Werte treten bei paralleler und bei senkrechter Anströmung auf. Ein geringerer Luftaustausch stellt sich bei Nordwestwind (Fenster auf Leeseite) ein. Wirken Wind und Thermik gleichzeitig, überwiegt bei kleinen Windgeschwindigkeiten der Temperatureinfluß. Steigt die Windgeschwindigkeit an, erfolgt je nach Höhe der wirksamen Temperaturdifferenz ein kontinuierliches Ansteigen des Zuluftvolumenstroms. Dies gilt allerdings nur für die betrachteten kleinen Öffnungsweiten. Bei großen Fensteröffnungen wird der Effekt beobachtet, daß bei gleichzeitigem Temperatur- und Windeinfluß der Luftaustausch bereichsweise abnimmt.

Die Meßdaten werden für die Anpassung eines Rechenmodells herangezogen, welches den Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, Temperaturdifferenz Raum-/Außenluft und einem Turbulenzanteil beschreibt. Als geometrische Bezugsgröße gilt die lichte Fensteröffnung. Die jeweilige Fensterstellung wird über ein experimentell ermitteltes Durchflußverhältnis berücksichtigt.

$$\dot{V}_{\text{Zu,R}} = 3600 \frac{1}{2} A_l \Theta \sqrt{(C_1 u^2 + C_2 H \Delta\vartheta + C_3)}$$

mit

$$C_1 = 0,0056 \quad C_2 = 0,0037 \text{ m}/(\text{s}^2 \text{ K}) \quad C_3 = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Die Modellanpassung, die aufgrund der o. g. Problematik bei größeren Öffnungen nur für kleine Öffnungsweiten erfolgt, zeigt bei dem Vergleich Messung/Rechnung eine mittlere Abweichung von 2,15 m<sup>3</sup>/h und eine maximale relative Abweichung von +39 % bzw. -41 % bei einer Standardabweichung von 9,95 m<sup>3</sup>/h.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Rechenmodells können folgende Aussagen getroffen werden:

- Der durch thermische Wirkung bedingte Luftaustausch wird mit dem Modellansatz gut beschrieben. Größere Abweichungen treten bei Temperaturdifferenzen in den Bereichen kleiner 5 K und größer 20 K auf.
- Der maßgeblich windinduzierte Luftwechsel wird infolge der im Rechenmodell nicht berücksichtigten Anströmrichtung nur ungenau erfaßt.
- Bei gleichzeitiger Einwirkung von Wind und Thermik findet sich eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten.
- Turbulenzeffekte können im Rahmen der Genauigkeit des Modells über einen Koeffizienten beschrieben werden.
- Die rechnerische Bestimmung des Durchflußverhältnisses aus der Geometrie der Fensteröffnung führt bei kleinen Öffnungsweiten zu großen Ungenauigkeiten.
- Die Übertragbarkeit des Modells ist begrenzt auf Gebäude, die in geometrischer Form und Lage den Bedingungen des Versuchsstandes in etwa entsprechen.

Zur Betrachtung des Luftwechsels und der damit verbundenen Lüftungswärmeverluste werden die meteorologischen Verhältnisse am Standort der Versuchseinrichtung herangezogen. Die Dauer der Heizzeit wird über die Definition der Gradtagzahl festgelegt und beträgt 269 bzw. 218 Tage bei Heizgrenztemperaturen von 15 bzw. 12 °C. Hinsichtlich des Nutzerverhaltens werden die Fälle 'permanente Öffnung über 24 h', 'intermittierendes Lüften zu Tagstunden' und 'Nachtlüftung' bei unterschiedlichen Fensterstellungen behandelt.

Für den resultierenden Luftwechsel lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Bei permanenter Öffnung des Kippfensters von 2 bzw. 10 cm treten in der Heizzeit mit der Heizgrenztemperatur von 15 °C Luftwechsel von 0,56 bzw. 1,38 h<sup>-1</sup> auf. Das Raumvolumen beträgt hierbei 58,5 m<sup>3</sup>. Liegt die Heizgrenztemperatur bei 12 °C, erhöht sich der Luftwechsel um ca. 5 %.
- Bei tagsüber 8-stündigem, intermittierendem Lüften findet ein Luftaustausch mit o. g. Bedingungen von 0,21 bis 0,45 h<sup>-1</sup> statt. Der Einfluß der resultierenden Gradtagzahl wird geringer und führt zu einer etwa 3 %-igen Anhebung des mittleren Luftwechsels.

- Die Lüftung während der Nachtstunden führt bei Berücksichtigung einer Nachtabsenkung auf 16 °C Raumlufttemperatur zu Luftwechseln von 0,2 bis 0,45 h<sup>-1</sup>. Wiederum erhöht sich der Luftwechsel um ca. 5 % bei kleinerer Gradtagzahl.

Die rechnerische Bestimmung des Lüftungswärmeverlustes mit einem stationären Ansatz liefert folgende Ergebnisse:

- Bei permanenter Öffnung des Kippfensters von 2 bzw. 10 cm und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C beträgt der Lüftungswärmeverlust 0,15 bzw. 0,38 kW. Für die Mittelwerte des jährlichen Lüftungswärmeverlustes über die Heizzeit bedeutet dies Werte von 999 bzw. 2448 kWh/a.
- Der mittlere Lüftungswärmeverlust nimmt bei einer Heizgrenztemperatur von 12 °C um ca. 13 % gegenüber o. g. Werten zu. Eine Reduktion um 7,5 % ergibt sich beim Vergleich der jährlichen Lüftungswärmeverluste.
- Gelingt es durch verschärfte Dichtheitsanforderungen den Infiltrationsluftwechsel um 0,15 h<sup>-1</sup> zu senken, so bedeutet dies für den in der Wärmeschutzverordnung angesetzten Luftwechsel von 0,8 h<sup>-1</sup> eine Absenkung um etwa 10 %.

## 10. Literaturverzeichnis

Alexander, D. K.; Etheridge, D. W. und Gale, R.:

**Experimental Techniques for Ventilation Research.** AIC Conference "Instrumentation and Measuring Techniques" 1980, Cumberland Lodge, Windsor, U.K.

Amara, F.; Depecker, P. und Allard, F.:

**OPTIBAT: A Real Scale Cell in Simulated Climatic Environment for Multizone Air Flow Pattern in Building.** 13th AIVC Conference "Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality" 1992, Nice, Frankreich, S. 519-527.

Axley, J.:

**An Integral Mass Balance Formulation of the Constant Concentration Tracer Technique.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 3, Ottawa, Canada, S. 39-49.

Behr, N. und Fuß, E.:

**Aufbau einer Meßeinrichtung zur Ermittlung von Luftwechselraten.** Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Maschinenbau, 1992.

Brouns, C. E. und Waters, J. R.:

**A Four Zone Ventilation Test Facility.** 14th AIVC Conference "Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration" 1993, Copenhagen, Dänemark, S. 493-507.

Charlesworth, P.S. (Hrsg.):

**Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques - An Applications Guide.** Air Infiltration and Ventilation Centre, Oscar Faber Partnership (1988).

Compagnon, R.; Koehler, A.; Roecker, C. und Roulet, C.-A.:

**Development of an Efficient Control Algorithm for a Multizone Constant Concentration Tracer Gas Air Infiltration Measurement System.** 9th AIVC Conference 1988 "Effective Ventilation", Gent, Belgien, S. 103-121.

Conan, G.:

**Variations in Householders' Window Opening Patterns.** 3rd AIC Conference "Energy Efficient Domestic Ventilation Systems for Achieving Acceptable Indoor Air Quality" 1982, London, U. K., S. 3.1-3.19.



Daler, R.; Hirsch, E.; Haberda, F.; Knöbel, U. und Krüger, W.:

**Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau.** Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 84-028, 1984.

DIN 1946:

**DIN 1946 - 6 "Raumluftechnik - Lüftung von Wohnungen: Anforderungen, Ausführung, Abnahme"** (September 1994).

DIN 4108:

**DIN V 4108 - 6 "Wärmeschutz im Hochbau - Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden"** (April 1995).

DIN 4701:

**DIN 4701 "Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden"** (März 1983).

Dorer, V. und Fürbringer, J.-M.:

**Comparison of Multizone Air Flow Measurements & Simulations of the LESO Building Including Sensitivity Analysis.** 14th AIVC Conference "Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration" 1993, Copenhagen, Dänemark, S. 587-595.

Dubrul, C.:

**Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation - a Summary Report of IEA Annex VIII.** Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note AIVC 23, 1988.

Ducarme, D.; Vandaele, L. und Wouters, P.:

**Single-sided Ventilation: A Comparison of the Measured Air Change Rates with Tracer Gas and with the Heat Balance Approach.** 15th AIVC Conference "The Role of Ventilation" 1994, Buxton, U. K., S. 67-76.

Erhorn, H. und Gertis, G.:

**Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel?** Gesundheits-Ingenieur 107 (1986), Heft 1, S.12 und 74-76.

Feustel, H. E. und Raynor-Hoosen, A. (Hrsg.):

**Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS.** Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note AIVC 29, 1990.

Fleury, B. und Nicolas, C.:

**Occupants' Behaviour with Respect to Window Opening: A Technical & Sociologic Study.** 13th AIVC Conference "Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality" 1992, Nice, Frankreich, S. 197-206.

Geiger, B.: [I]

**Verbraucherverhalten angesichts baulicher und technischer Rahmenbedingungen.** Einfluß des Verbraucherverhaltens auf den Energiebedarf privater Haushalte. Vorträge der Tagung in München, 16. Okt.1981, Springer Verlag, Berlin 1982, S. 11-36.

Geiger, B. und Rouvel, L.: [II]

**Lüftung im Wohnungsbau - Fensterlüftung.** HLH 38 (1987), H. 4, S. 185-190.

Gertis, K.: [I]

**Superdämmung oder Wärmerückgewinnung? Wo liegen die Grenzen des energiesparenden Wärmeschutzes?** Bauphysik 3 (1981), H. 2, S. 50-56.

Gertis, K.: [II]

**Grundlagen der Wohnungslüftung.** Sonnenenergie & Wärmepumpe 8 (1983), H. 5, S. 33-36.

Grot, R. und Lagus, P.:

**Application of Tracer Gas Analysis to Industrial Hygiene Investigations.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 1, Ottawa, Canada, S. 411-471.

Haghighat, F. und Riberon, J.:

**Modelling Fluctuating Airflow Through Large Openings.** 13th AIVC Conference "Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality" 1992, Nice, Frankreich, S. 77-85.

Hartmann, P.; Pfiffner, I. und Bargetzki, S.:

**Luftwechsel-Meßwerte von ausgewählten Wohnbauten in der Schweiz.** KI - Klima-Kälte Ingenieur (1978), H. 3, S. 233-237.

Hauser, G.: [I]

**Feuchteschutztechnische Probleme. Energiesparmaßnahmen und die möglichen Folgen.** DBZ 30 (1987), H.4, S.433-437.

Hauser, G. und Maas, A.: [II]

**Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten.** Aachener Bausachverständigentage 1991 "Fugen und Risse in Decke und Wand", Bauverlag Wiesbaden, 1991. DBZ 24 (1992), H.1, S.97-100.

Hauser, G. und Hausladen, G.: [III]

**Energiekennzahl zur Beschreibung des Heizenergiebedarfs von Wohngebäuden (Version 3.1).** Herausgeber: Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V., Berlin. Energiepaß-Service Hauser & Hausladen GmbH, Baunatal, 1993.

Hausladen, G.:

**Wohnungslüftung. Untersuchung der verschiedenen Lüftungsarten bzw. Lüftungspraktiken unter hygienischen, bauphysikalischen und energetischen Gesichtspunkten. (Dissertation).** VDI-Bericht Reihe 6, Nr. 73, 1980.

Heidt, F.-D.:

**Fortschritte bei der Luftwechsellmessung durch Mikrocomputereinsatz.** HLH 38 (1987) Nr. 8, S. 391-395.

Künzel, H.:

**Repräsentativumfrage über die Heiz- und Lüftungsverhältnisse in Wohnungen.** Gesundheits-Ingenieur 100 (1979) H. 9, S. 261-292.

Latzel, W.:

**Theoretische und experimentelle Methoden der Regelungstechnik, Band 13 - Regelung mit dem Prozessrechner (DDC).** Bibliographisches Institut - Wissenschaftsverlag, Zürich, 1977.

Liddament, M. W.:

**Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide.** Air Infiltration and Ventilation Centre, Oscar Faber Partnership (1986).

Lobeck, W und Masuhr, F.:

**Praktische Luftwechsellermittlung.** HLH 41 (1990), H. 12, S. 968-974 und S. 1051-1056.

Mettler-Meibom, B.: [I]

**Soziale und ökonomische Bestimmungsgrößen für das Verbraucherverhalten.** Einfluß des Verbraucherverhaltens auf den Energiebedarf privater Haushalte. Vorträge der Tagung in München, 16. Okt.1981, Springer Verlag, Berlin 1982, S. 37-72.

Mettler-Meibom, B. und Wichmann, B.: [II]

**Informationsstand und Einstellung als Verhaltensregulative.** Einfluß des Verbraucherverhaltens auf den Energiebedarf privater Haushalte. Vorträge der Tagung in München, 16. Okt.1981, Springer Verlag, Berlin 1982, S. 73-88.

Oppermann, J.:

**Experimenteller Aufbau und regelungstechnische Untersuchungen zur Ermittlung des Luftwechsels in natürlich gelüfteten Räumen.** Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Elektrotechnik, 1994.

Panzhauser, E. und Ertl, H.:

**Die Luftwechselzahlen in Österreichischen Wohnungen.** Zusammenfassender Bericht, F 827.

Pelletret, R.; Liebecq, G.; Allard, F. und van der Maas, J.:

**Modelling of Large Openings.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 1, Ottawa, Canada, S. 99-109.

Phaff, J. C.; de Gids, W. F.; Ton, J. A.; v/d Ree, D. und 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, Delft, Niederlande, Rapport C 448, 1980.

Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T. und Flannery, B. P.:

**Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing.** Cambridge University Press, 1992.

Raatschen,W.: [I]

**Was ist Lüftungseffektivität?** KI Klima-Kälte-Heizung (1988), H. 5, S. 226-231, H. 6, S. 291-296, H. 7-8, S. 331-334.

Raatschen,W.: [II]

**Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik.** Teil 1. Gesundheits-Ingenieur 116 (1995), H. 2, S. 78-112.

Rabenstein, R.: [I]

**Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden der Luftwechselsmessung in Räumen und Gebäuden.** Forschungsbericht, Universität-GH Siegen, Ingenieurphysik, 1990.

Rabenstein, R. und Heidt, F. D.: [II]

**A New Control Algorithm for the Measurement of Variable Air Change Rates.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 2, Ottawa, Canada, S. 153-166.

Rao, J. und Haghghat, F.:

**Wind Induced Fluctuating Air Infiltration in Buildings.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 1, Ottawa, Canada, S. 111-121.

Roulet, C.-A. und Scartezzini, J.: [I]

**Stochastic Model of Inhabitant Behaviour In Regard to Ventilation.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 2, Ottawa, Canada, S. 21-38

Roulet, C.-A.; Cretton, P.; Fritsch, R. und Scartezzini, J.-L.: [II]

**Stochastic Model of Inhabitant Behaviour in Regard to Ventilation. Annex 20: Air Flow Patterns within Buildings. Subtask 2: Technical Report.** International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 1991.

Roulet, C.-A. und Vandaele, L. (Hrsg.): [III]

**Airflow Patterns within Buildings - Measurement Techniques.** Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note 34, Oscar Faber Partnership (1991).

Sandberg, M. und Blomqvist, C.:

**A Quantitative Estimate of the Accuracy of Tracer Gas Methods for the Determination of the Ventilation Flow Rate in Buildings.** Building and Environment 20 (1985), H. 4, S. 139-150.

Schulze, H. D. und Schuschke, G.:

**Studie über Notwendigkeit und Zuverlässigkeit von Luftwechsel- und Luftvolumenstrommessungen.** Gesundheits-Ingenieur 111 (1990), Heft 1, S. 12-16.

Sherman, M. H.: [I]

**A Multitracer System for Multizone Ventilation Measurement.** University of Carolina, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division, Indoor Environment Program, LBL-29010, 1980.

Sherman, M. H.: [II]

**Tracer-Gas Techniques For Measuring Ventilation in a single Zone.** Building and Environment 25 (1990), H. 4, S. 365-374.

Sponer, J.:

**Script zur Vorlesung 'Grundlagen der Regelungstechnik'**. Universität-Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Regelungstechnik, 1991.

Stanzel, W.; Novy, M. und Spitzer, J.:

**Bestimmung des Luftaustausches in bewohnten Gebäuden über eine Feuchte- und Wärmebilanz.** KI Klima-Kälte-Heizung (1978), H. 7-8, S. 311-314.

Stymne, H. und Eliasson, A.:

**A New Passive Tracer Gas Technique for Ventilation Measurements.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 3, Ottawa, Canada, S. 1-17.

van der Maas, J. (Hrsg.): [I]

**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.

van der Maas, J.; Bienfait, D.; Vandaele, L. und Walker, R.: [II]

**Single Sided Ventilation.** 12th AIVC Conference "Air Movement and Ventilation Control Within Buildings" 1991, Band 1, Ottawa, Canada, S. 73-98.

van der Maas, J.; Hensen, J. L. M. und Roos, A.: [III]

**Ventilation and Energy Flow Through Large Vertical Openings in Buildings.** 15th AIVC Conference "The Role of Ventilation" 1994, Buxton, U. K., S. 289-301.

Volkman, H.:

**Ermittlung der Lüftungseffektivität mit der Konzentrationsabfall-Methode.** Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Maschinenbau, 1993.

Warren, P. R.:

**Ventilation Through Openings on One Wall Only.** International Conference on Heat and Mass Transfer in Buildings 1977.

Wegner, J.:

**Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels in ausgeführten Wohnungen, die mit sehr fugendichten Fenstern ausgestattet sind.** Gesundheits-Ingenieur 104 (1983), H. 1, S. 1-56.

Wouters, P. und de Baets, D.: [I]

**A Detailed Statistical Analysis of Window Use and its Effect on the Ventilation Rate in 2400 Belgian Social Houses.** 7th AIC Conference "Occupant Interaction with Ventilation Systems" 1986, Stratford-upon-Avon, U. K., S. 32-53.

Wouters, P.; L'Heureux, D. und Geerinckx, B.: [II]

**Natural Ventilation in 18 Belgian Apartments: Final Results of Longterm Monitoring.** 14th AIVC Conference "Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration" 1993, Copenhagen, Dänemark, S. 369-377.

WSchVO:

**Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV) vom 16. August 1994.**  
Bundesgesetzblatt Teil 1, Bonn, 24. August 1994, S. 2121-2131.

## Anhang

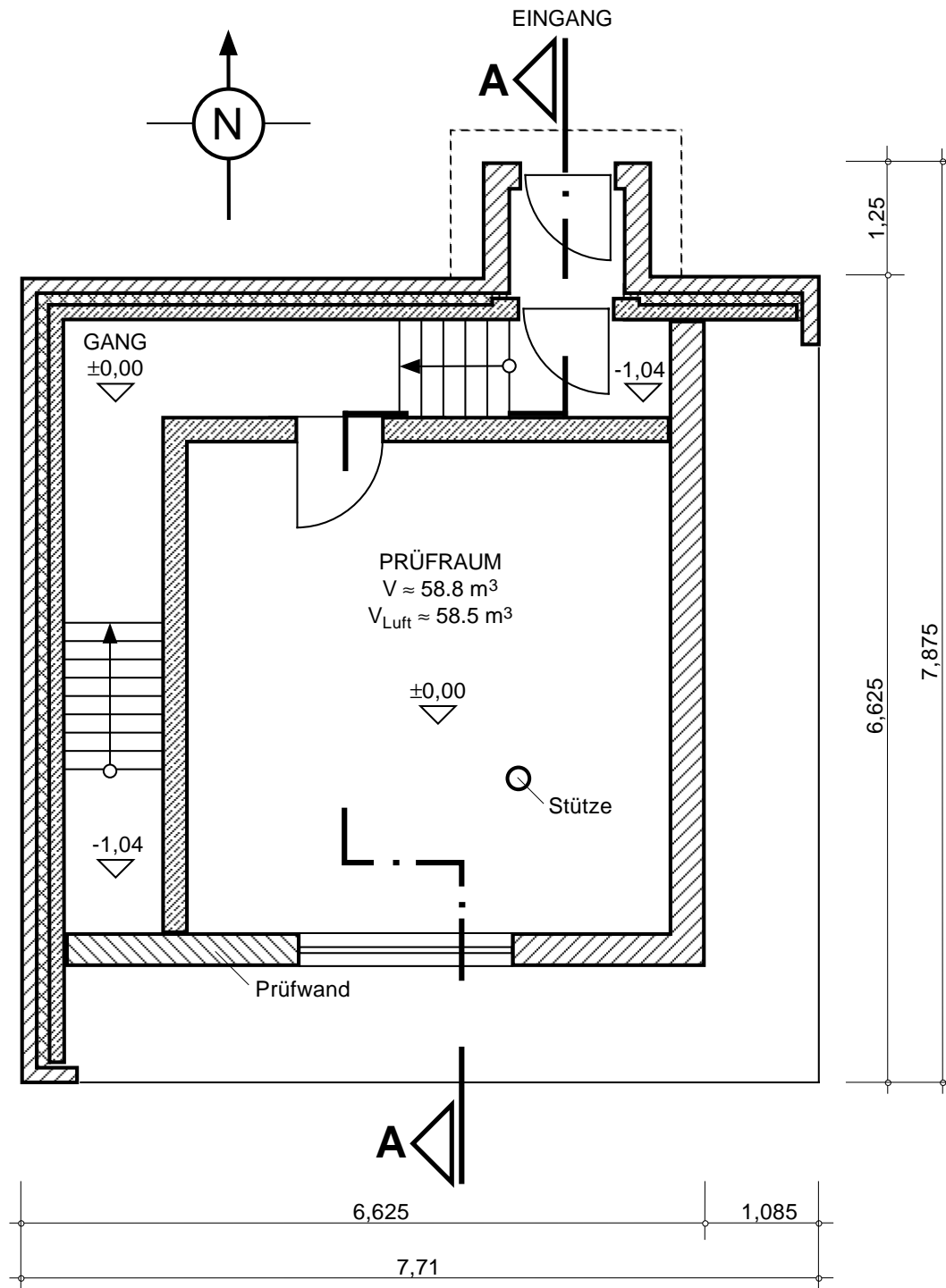


Bild A.1: Grundriß des Versuchsbäudes.



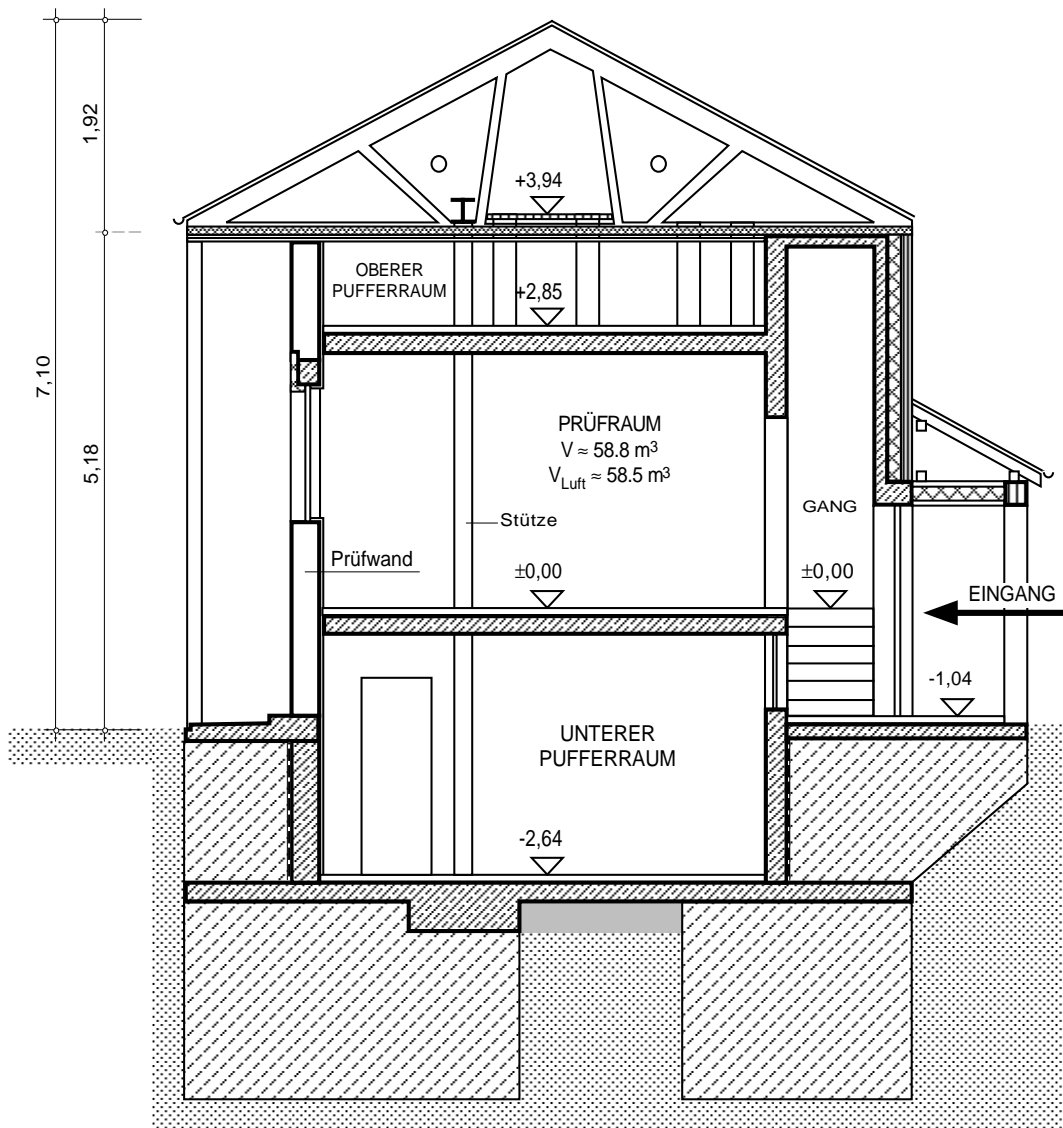
**Schnitt A-A**

Bild A.2: Schnitt des Versuchsgebäudes.

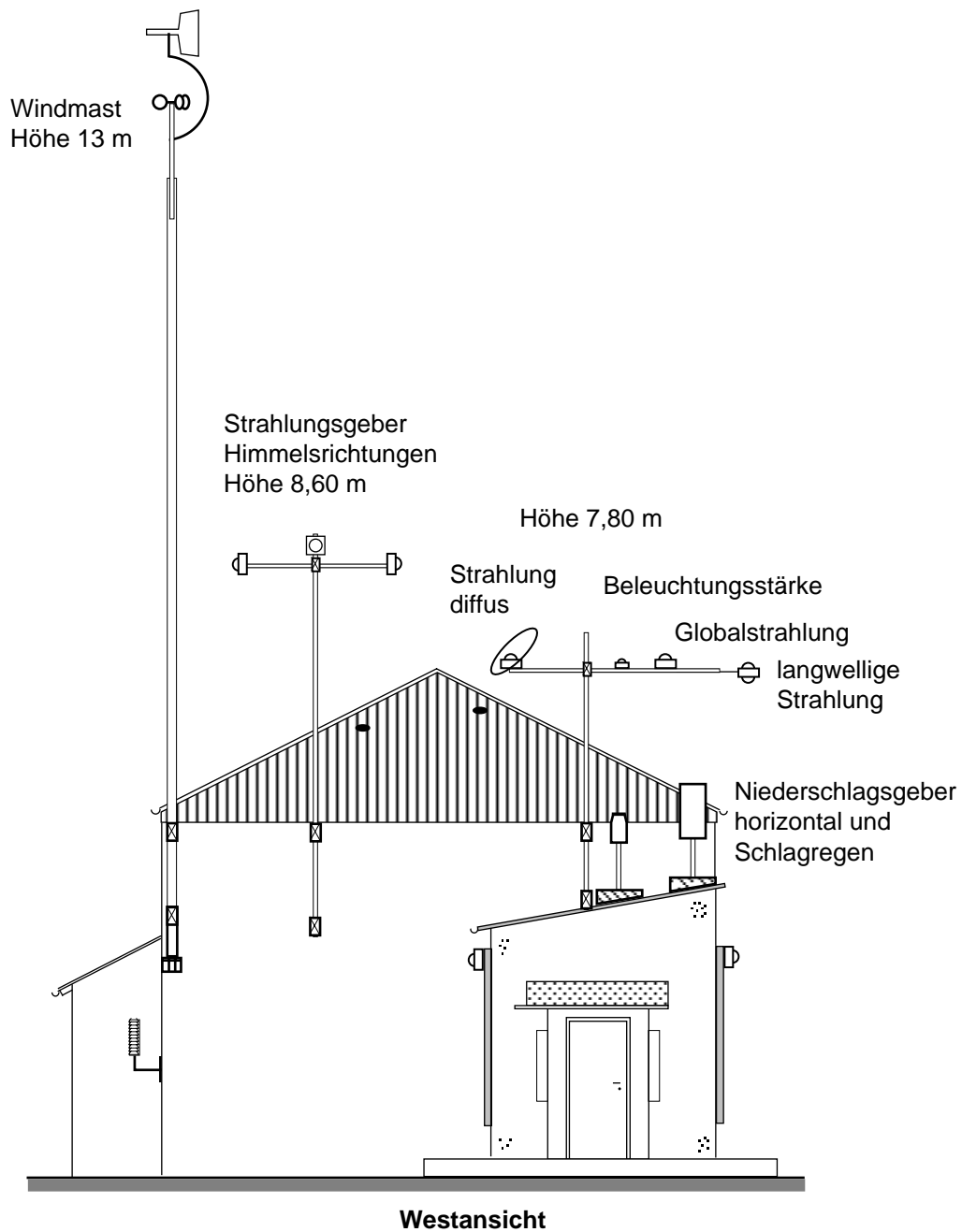


Bild A 3: Ansicht (West) des Versuchsbäudes und Anordnung der meteorologischen Meßeinrichtungen.