



Lüftungsregeln für freie Lüftung

K. Fitzner, U. Finke

**Forschung
Projekt F 2072**

K. Fitzner
U. Finke

Lüftungsregeln für freie Lüftung

Dortmund/Berlin/Dresden 2012

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Entwicklung einer praxisorientierten Handlungsanleitung zur Festlegung von Lüftungsregeln bei freier Lüftung als Grundlage einer neuen Arbeitsstättenregel ‚Lüftung‘ nach ArbStättV“ – Projekt F 2072 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Finke
KLIMAKONZEPT Ingenieurgesellschaft b.R.
Olympische Str. 3 a, 14052 Berlin
Telefon 030 30108-880, 030 30108-881
Fax 030 30108-882
finke@klimakonzept.de
www.klimakonzept.de

Titelfoto: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Finke,
KLIMAKONZEPT Ingenieurgesellschaft b.R.

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
poststelle@baua.bund.de
www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-105-2

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Ziele des Forschungsvorhabens	7
2 Festlegung von Zielgrößen	8
2.1 Luftqualität	8
2.2 Raumklima und thermische Behaglichkeit	10
2.2.1 Temperaturen	10
2.2.2 Luftfeuchte	12
2.2.3 Luftgeschwindigkeit	12
2.3 Raumklima und Leistungsfähigkeit	13
2.4 Hygiene	14
2.5 Akustik	15
3 Physikalische Grundlagen der freien Lüftung	16
3.1 Thermische Lasten	16
3.2 Auftriebs- und Windkräfte	16
3.3 Gebäudedurchströmung	20
3.4 Raumdurchströmung bei geöffnetem Fenster	23
3.5 Raumtemperatur und maximale thermische Lasten	29
3.5.1 Sommerfall	29
3.5.2 Winterfall	30
3.6 Speicherung	32
3.7 Konzentrationsverlauf	33
4 Bautechnische Grundlagen	34
4.1 Fenster	34
4.2 Außenwandluftdurchlässe (ALD)	38
4.3 Klappen	40
4.4 Schächte	40
5 Untersuchungen	41
5.1 Versuchsaufbau	41
5.1.1 Raumdaten	41
5.1.2 Messgeräte	47
5.1.3 Innere Lasten	49
5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	50
5.2.1 Kalibrierung des dichten Raumes	50
5.2.2 CO ₂ -Anstieg durch die Teelichter und die Personen	51
5.2.3 Infiltration bei geschlossenen Fenstern	52
5.2.4 Hohe thermische Last	53
5.2.5 Konstante Differenz der CO ₂ -Konzentration bei geringer Last	59
5.2.6 Stoßlüftung	62

6	Handlungsanleitung	76
6.1	Stationäre Lüftung (Spaltlüftung)	76
6.2	Stoßlüftung	79
7	Zusammenfassung und Ausblick	81
	Literaturverzeichnis	83
	Symbolverzeichnis	87

Lüftungsregeln für freie Lüftung

Kurzreferat

Im Auftrag der BAuA wurde von der Firma Klimakonzept ein Feldversuch in einem Büro mit Fensterlüftung im Winter durchgeführt. Es sollte geprüft werden, ob die aus Laborversuchen bekannten Grenzen für thermische Behaglichkeit auch in der Praxis bestätigt werden. Daraus sollten Handlungsanweisungen und Regeln für die freie Lüftung abgeleitet werden.

Für die Versuche stand ein Büroraum mit einer Grundfläche von 80 m² und einem Volumen von 180 m³ zur Verfügung. Acht Kippfenster wurden so eingestellt, dass sich bei konstanten thermischen Lasten von ca. 10 W/m² oder 30 W/m² und mit konstanter CO₂-Quelle von 117 l/h eine konstante CO₂-Konzentration im Raum einstellte. Der Volumenstrom und die Kühlleistung der eintretenden Luft sowie die Kippstellung des Fensters wurden ermittelt und mit anderen Ergebnissen der veröffentlichten Fachliteratur verglichen. Temperatur und Luftgeschwindigkeit wurden an kritischen Stellen für die Behaglichkeit gemessen. Neben der Dauerlüftung wurden auch zwei Messungen zur Stoßlüftung durchgeführt.

Ergebnis: Aus Behaglichkeitsgründen sollten in Büros Kippfenster mit stufenlos variablen, fest einstellbaren Kippweiten verwendet werden. Die Grenze der thermischen Behaglichkeit wird erreicht, wenn die thermische Last bei Raumtiefen von 5 m 30 W/m² überschreitet und auch, wenn die Außentemperatur niedriger als 6°C ist. Für die Volumenströme können die erforderlichen Kippweiten abhängig von der Außentemperatur und der Fensterhöhe näherungsweise angegeben werden. Die Ergebnisse stimmen mit denen früherer Laboruntersuchungen gut überein.

Für den Fall, dass die Grenzwerte überschritten werden, sollte dennoch reduziert Fensterlüftung bis zur Behaglichkeitsgrenze und zusätzlich Stoßlüftung oder besser maschinelle Lüftung angewendet werden. Zur überschlägigen Berechnung der Kippweiten und der Öffnungs- und Schließzeiten werden Angaben gemacht. Energetisch ist die Stoßlüftung häufig, aber nicht in jedem Fall günstiger als die Dauerlüftung.

Schlagwörter:

Fensterlüftung, Dauerlüftung, Stoßlüftung, thermische Behaglichkeit, Kippfenster, CO₂-Konzentration

Rules for natural ventilation

Abstract

On behalf of the BAuA, the company Klimakonzept investigated natural window ventilation in an office during winter. It was to be checked whether limits of thermal comfort from laboratory experiments concur with practical results.

An office room with a floor area of 80 m² and a volume of 180 m³ was used for the experiments. The opening of eight bottom hung windows was fixed in a position that resulted in a constant CO₂ concentration if a constant thermal load of 10 and 30 W/m² and a constant CO₂ source of 117 l/h were applied. The air flow rate and the cooling load of the entering air and the width of the window opening were registered and compared with data from published studies. Additionally to the constant ventilation intermittent airing (shock ventilation) was used in two measurements.

Result: Bottom hung windows should be used with variable fixable opening widths for thermal comfort reasons. Thermal comfort requires thermal loads lower than 30 W/m² for rooms 5 m long and outdoor temperatures higher than 6 °C. The required opening of the windows to realize a set air flow rate can roughly be given as a function of the outdoor air temperature and the height of the window. The results agree well with earlier results from laboratory measurements.

However, if the limits are exceeded, constant ventilation up to the comfort limitation should be used together with additional intermittent or better with mechanical ventilation. Data are given for the estimation of the window openings and opening times. In respect to energy consumption the intermittent ventilation frequently shows an advantage compared with constant ventilation, but this does not apply in all cases.

Key words:

window ventilation, constant ventilation, intermittent airing (shock ventilation), thermal comfort, bottom hung window, CO₂-concentration

1 Ziele des Forschungsvorhabens

Aufenthaltsräume von Personen müssen aus hygienischen Gründen ausreichend mit Außenluft versorgt werden. In vielen Anwendungsfällen werden dazu Fenster oder spezielle Durchlässe in der Außenwand verwendet. Dabei stellen sich die Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten im Raum ein abhängig von

- Außentemperatur,
- innerer Last,
- Wind,
- Stellung des Fensters oder des Luftdurchlasses,
- Lage des Raumes im Gebäude,
- Ankopplung an das Gebäude.

Um thermisch behagliche Zustände im Raum zu erreichen, müssen Einsatzgrenzen beachtet werden. Außerdem muss der Mindestluftaustausch eingehalten werden, der beispielsweise über den zulässigen CO₂-Gehalt der Luft festgelegt werden kann.

Es soll gezeigt werden, wie Räume mit freier Lüftung im Winter belüftet werden können, speziell für den Fall hoher thermischer Lasten, wie sie z. B. in Büros auftreten können. Es sollen Anwendungsgrenzen für den Einsatz der freien Lüftung in Diagrammen und Tabellen dargestellt werden. Die Grenzen hierfür sollen unter dem Gesichtspunkt der thermischen Behaglichkeit und der Luftqualität über den CO₂-Gehalt bestimmt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Grenzen der Fensterlüftung erreicht sind, wenn der erforderliche Außenluftvolumenstrom zu gering ist oder der zulässige Bereich für die Behaglichkeit überschritten wird.

In der Frage der Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von freier Lüftung werden unterschiedliche Auffassungen vertreten. Durch die Forschungsarbeit werden die Grundlagen zur richtigen Dimensionierung und Anwendung herausgearbeitet. Es werden unter Berücksichtigung von Hygiene, Luftqualität und Behaglichkeit Berechnungsregeln zur Dimensionierung und Verhaltensregeln für die Nutzer abgeleitet. Dadurch erhalten Nutzer, Bauherren und Architekten die Möglichkeit, besser zu entscheiden und arbeitsplatzgerecht zu lüften.

Es sollen damit Handlungsanweisungen geschaffen werden, mit denen sich die freie Lüftung optimieren lässt, so dass möglichst keine Einschränkung des Wohlbefindens auftritt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens tragen somit zum Arbeitsschutz und zur Arbeitssicherheit bei.

2 Festlegung von Zielgrößen

2.1 Luftqualität

Ein Indikator für die Luftqualität im Raum ist die CO₂-Konzentration, wenn andere Quellen wie z. B. Emissionen aus Baustoffen vernachlässigt werden können. Kohlendioxidquellen in Büroräumen sind die Personen selbst. Weil andere Geruchsstoffe, die Personen abgeben, daran gekoppelt sind, wird die CO₂-Konzentration häufig als Indikator für Luftqualität verwendet. Abb. 2.1 zeigt die Unzufriedenheitsrate der Raumnutzer als Funktion der Kohlendioxidkonzentration über der Konzentration der Außenluft. Die Außenluftkonzentration beträgt je nach geografischer Lage zwischen 350 ppm und 400 ppm.

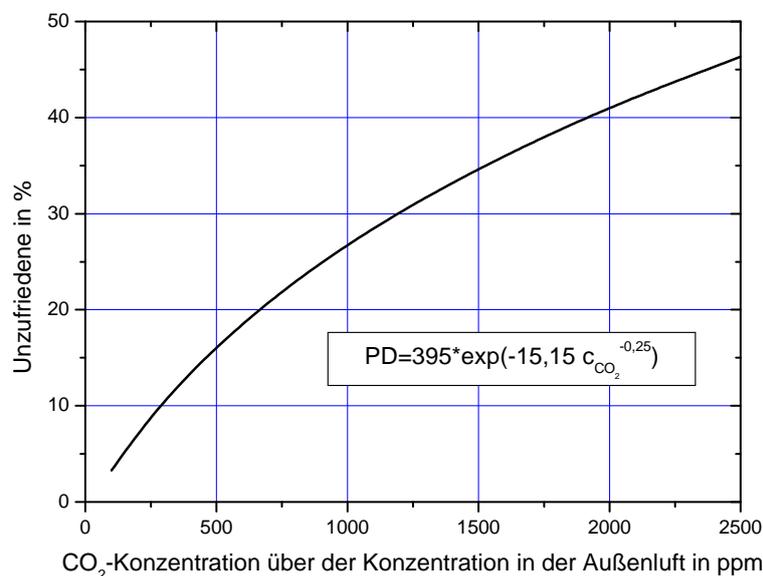


Abb. 2.1 Unzufriedene in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration (CEC 1992)

Bei einer Steigerung der CO₂-Konzentration gegenüber der Außenluft um 300 ppm werden ca. 10 % Unzufriedene erreicht. 30 % Unzufriedene treten bei 1.200 ppm über der Außenluftkonzentration auf.

Die CO₂-Konzentration durch menschliche Atmung¹ soll nach PETTENKOFER (1858) 1.000 ppm nicht überschreiten. Das entspricht nach Abb. 2.1 etwa 20 % Unzufriedener. Der Arbeitsplatzgrenzwert (früher MAK-Wert) beträgt dagegen

¹ Pettenkofer (1858), S. 78: „Aus diesen Versuchen geht zur Evidenz hervor, dass uns keine Luft behaglich ist, welche in Folge der Respiration und Perspiration des Menschen mehr als 1 pro mille Kohlensäure enthält.“ Diese Aussage lässt nicht eindeutig erkennen, ob damit eine Konzentrationserhöhung gegenüber der Umgebungsluft oder die Gesamtkonzentration gemeint ist. Aus den beschriebenen Versuchen (z. B. Seite 85) lässt sich ableiten, dass es um den Gesamtwert ging bei einer angenommenen Konzentration der Außenluft von 500 ppm. Die Forderung von Pettenkofer ist deshalb so zu interpretieren, dass eine Erhöhung der CO₂-Konzentration um 500 ppm zulässig ist, wenn die Luftqualität noch angenehm sein soll.

5000 ppm, wobei der hohe Wert nicht durch anthropogene Quellen entstehen soll, insofern ist die Erwähnung dieses Wertes hier vielleicht irreführend.

In Abb. 2.2 wird der Konzentrationsverlauf von Kohlendioxid in Abhängigkeit von der Zeit mit dem Zuluftvolumenstrom als Parameter in einem Beispielraum dargestellt. Bei der Berechnung werden als Quellen zwei Personen in einem 20 m² großen Büroraum berücksichtigt. Weitere Quellen sollen nicht vorhanden sein. Der Raum hat eine Höhe von 2,5 m und damit ein Raumvolumen von 50 m³.

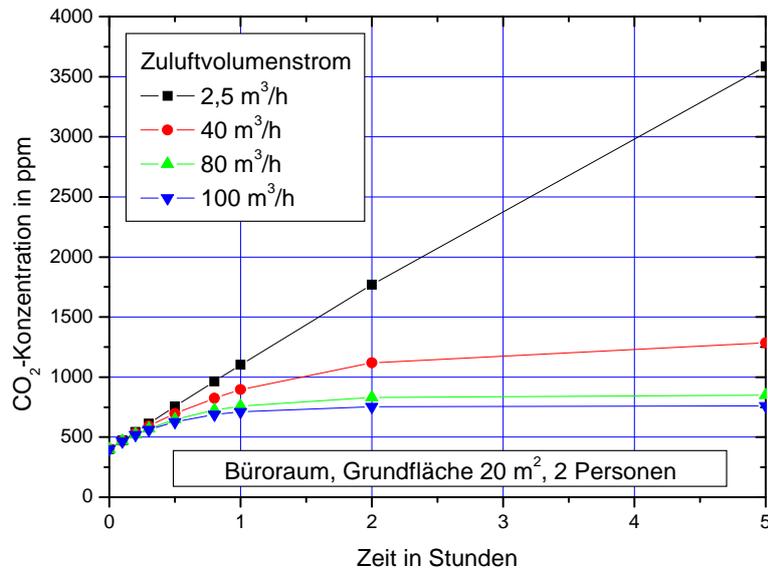


Abb. 2.2 Kohlendioxidkonzentration bei konstanten Quellen und unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen (Außenluftkonzentration 400 ppm)

Der Verlauf in Abb. 2.2 für konstante Volumenströme der Zuluft und der CO₂-Quelle wird folgendermaßen berechnet:

$$c(t) = c_a + \frac{q}{n \cdot V} (1 - e^{-nt}) \quad (2.1)$$

c(t)	CO ₂ -Konzentrationsverlauf über der Zeit	ppm
c _a = 400	Außenluft- und Anfangskonzentration	ppm
n	Luftwechsel je h	1/h
q	CO ₂ -Abgabe von 2 Personen	36 l/h
V	Raumvolumen	m ³

Ohne aktive Lüftung ist nur die Infiltration als Luftaustausch zu berücksichtigen, die hier mit 2,5 m³/h angenommen wird. In diesem Fall baut sich die Konzentration von CO₂ fast kontinuierlich auf und erreicht nach 5 Stunden einen Wert um 3.500 ppm. Eine niedrige Konzentration wird im Beispiel mit einem Außenluftvolumenstrom von

$$q_v = n \cdot V = 100 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2.2)$$

erreicht, was einem zweifachen Luftwechsel entspricht. Es tritt eine Konzentrationserhöhung von 360 ppm ein. Pettenkofer hatte 60 m³/h je Person für erforderlich gehalten. Die Zwischenwerte 40 m³/h und 80 m³/h werden mit den Anforderungen nach AMEV (>20 m³/h/Person) und nach der früheren DIN 1946 Teil 2 (40 m³/h/Person) erreicht. Soll der Anstieg der CO₂-Konzentration begrenzt werden, so muss ausreichend gelüftet werden.

In maschinell belüfteten Büroräumen wird der Richtwert für die CO₂-Konzentrationen in der Regel eingehalten. In frei belüfteten Räumen ist die CO₂-Konzentration häufig höher als in maschinell belüfteten Gebäuden (FINKE, FITZNER 1996). Extreme Werte werden in Schulen erreicht. In Schulen werden im Winter nicht selten Kohlendioxidkonzentrationen bis zu 5.000 ppm erreicht (FITZNER 1996).

2.2 Raumklima und thermische Behaglichkeit

2.2.1 Temperaturen

Nach DIN EN 15251 ist für den Menschen thermische Behaglichkeit gegeben, wenn er mit Temperatur, Feuchte und Luftbewegung in seiner Umgebung zufrieden ist und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht. Dabei ist es weitgehend unerheblich, ob sich Personen in einem klimatisierten Raum oder in einem fensterbelüfteten Raum befinden. Das Empfinden ist in beiden Fällen vergleichbar. Das wird von DIN EN 15251 berücksichtigt.

Es gibt auch die Meinung, dass in klimatisierten und nicht klimatisierten Räumen unterschiedliche Ansprüche gestellt werden, weil die Erwartungshaltung anders ist.

Für das Temperaturempfinden des Menschen ist nicht allein die Temperatur der Raumluft maßgebend, sondern auch die Temperatur der sichtbaren Wände oder Umschließungsflächen eines Raumes. Solange die Temperaturunterschiede zwischen der Luft und den Wänden nicht groß sind und die Luftgeschwindigkeiten im Behaglichkeitsbereich liegen, gilt in guter Näherung, dass etwa 50 % der Wärmeabgabe des Menschen durch Strahlung an die Raumflächen erfolgt. Deshalb wird die operative Temperatur Θ_o verwendet, die die Lufttemperatur Θ_L und die mittlere Strahlungstemperatur $\overline{\Theta_s}$ der Raumumschließungsflächen mittelt.

$$\Theta_o = 0,5 (\overline{\Theta_s} + \Theta_L) \quad (2.3)$$

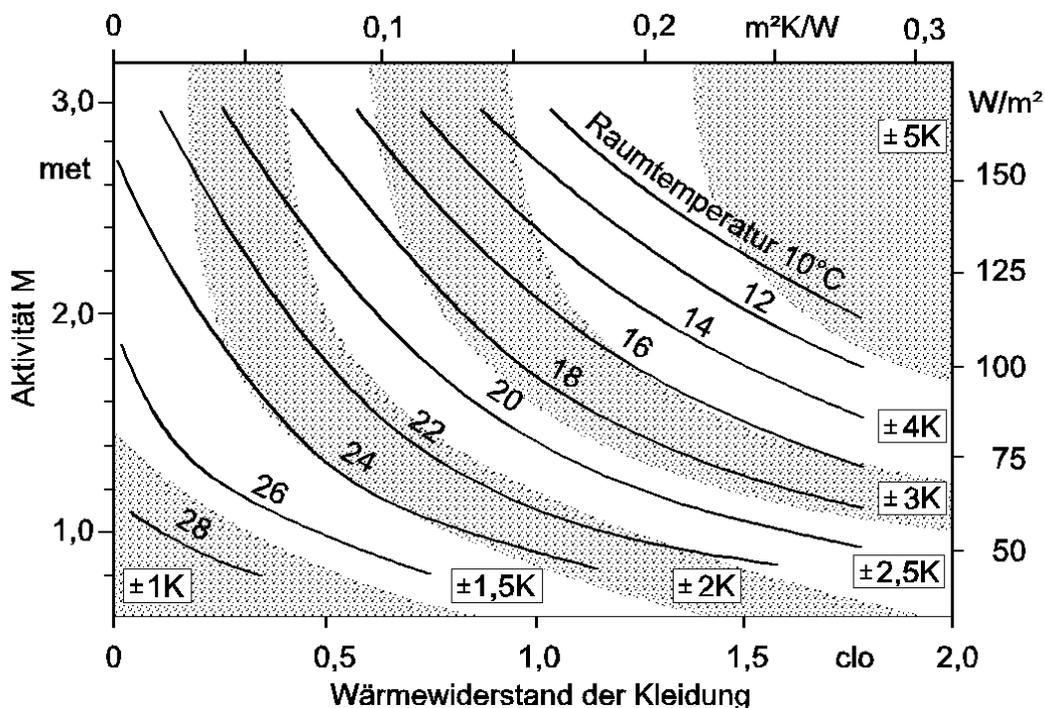
Die zulässigen operativen Temperaturen nach DIN EN 13779 sind Tab. 2.1 zu entnehmen und gelten für die Mitte des Raumes in einer Höhe von 0,6 m. Werden keine anderen Vereinbarungen getroffen, gelten die in der Tabelle genannten Werte.

Tab. 2.1 Anforderungen an die operative Temperatur

	Operative Temperatur in °C		
	üblicher Bereich	Standardwerte für die Auslegung	Optimale operative Temperatur
Winterbetrieb mit Heizen	19 °C – 24 °C	21 °C (Mindesttemperatur am Tag)	21,5 °C
Sommerbetrieb mit Kühlen	23 °C – 26 °C	26 °C (Höchsttemperatur am Tag)	24,5 °C

Die Standardwerte für die Auslegung stellen die Mindesttemperatur im Winter bzw. die Höchsttemperatur an einem Tag in Sommer dar. In der letzten Spalte der Tabelle werden optimale Temperaturen aus Sicht der Behaglichkeit angegeben.

Etwas differenzierter wird in DIN EN ISO 7730 der Bereich der zulässigen operativen Temperaturen abhängig von der Aktivität und dem Wärmewiderstand der Bekleidung angegeben. Der Zusammenhang ist in Abb. 2.3 dargestellt. Abb. 2.3 zeigt, dass die behagliche Temperatur an Büroarbeitsplätzen (geringe Aktivität: 1,2 met; normale Bekleidung: 0,5 clo – 1,0 clo) ungefähr zwischen 22 °C und 25 °C liegt. Bei mehr Kleidung oder höherer Aktivität liegen die Temperaturen entsprechend niedriger. Außerdem ist dargestellt, wie weit die Temperaturen von den Sollwerten abweichen dürfen. Die Abweichungen entsprechen einem Prozentsatz Unzufriedener (PD) von 10 %. Mit steigender Aktivität und zunehmender Wärmedämmung der Kleidung dürfen die Abweichungen größer werden. Die Temperaturen in Büro- und Versammlungsräumen stellen sehr hohe Anforderungen an die Einhaltung der Grenzwerte, weil Aktivität und Wärmewiderstand der Kleidung klein sind.

**Abb. 2.3** Empfohlene operative Temperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Bekleidung (DIN EN ISO 7730)

2.2.2 Luftfeuchte

Die Auswirkungen der Luftfeuchte auf die Behaglichkeit des Menschen wurden sehr wenig untersucht. In den Normen und Richtlinien für die Klimatisierung von Büroräumen werden Grenzwerte für die Raumlufftfeuchte angegeben. Die Werte liegen zwischen 30% und 70% relativer Feuchte. Eine Obergrenze von 11,5 g Wassergehalt/kg Luft soll außerdem nicht überschritten werden. Die angegebenen Grenzen sollten allerdings nur kurzzeitig erreicht werden. Das gilt vor allem für die obere Grenze. Luftfeuchten an der oberen Grenze können schon als unangenehm schwül empfunden werden.

Ein bisher nicht endgültig geklärtes Phänomen ist, dass trotz korrekter Einstellung der Luftfeuchte vor allem in klimatisierten Räumen teilweise Symptome wie Trockenheitsgefühl, Halskratzen oder Augenbrennen auftreten. Erste Untersuchungen (GORES, RESKE, FITZNER 2003; KRIEGEL, ZEIDLER 1998) zeigen, dass ein nicht zu vernachlässigender Einfluss der Luftführung und der thermischen Last im Raum auf die Feuchteabgabe besteht. Personen werden bei Quelllüftung durch die eigene Auftriebsgrenzschicht von der Umgebung besser „abgeschirmt“ als bei Mischlüftung. Dadurch ist der Stoffaustausch mit der Umgebung geringer. Bei Mischströmung wird der Auftriebsvolumenstrom an der Person durch die Raumströmung gestört. Der Stoffaustausch mit der Umgebung steigt an. Entsprechend wird auch die Feuchteabgabe des Menschen beeinflusst und die Haut, insbesondere die Schleimhäute, trocknen stärker aus. Darüber hinaus nimmt die Feuchteabgabe der Körperoberfläche mit der thermischen Last im Raum sehr stark zu. Der Einfluss der thermischen Last übertrifft sogar den Einfluss der Raumströmung.

Bei Fensterlüftung im Winter ist die relative Luftfeuchte im Raum sehr niedrig. Sie dürfte mit zunehmender thermischer Last als unangenehmer empfunden werden.

2.2.3 Luftgeschwindigkeit

Die Thermosensoren der Haut reagieren empfindlich auf Änderungen der Hauttemperatur, die auch durch Schwankungen der Luftgeschwindigkeit hervorgerufen werden. Geschwindigkeitsschwankungen sind deshalb gut spürbar. Deshalb hängt die Behaglichkeit auch von der Luftgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad im Aufenthaltsbereich ab. Als Turbulenzgrad wird dabei die Schwankungsbreite (Standardabweichung) der Luftgeschwindigkeit bezogen auf die mittlere Luftgeschwindigkeit bezeichnet.

Die Behaglichkeit bezüglich der Luftgeschwindigkeit wird durch das „Zugluftrisiko“ beschrieben (siehe Gleichung 2.4). Das Zugluftrisiko (DR) sollte zwischen 10 % und 20 % liegen, wobei als Standardwert 15 % angesetzt werden.

$$DR = (34 - \theta_L)(v - 0,05)^{0,62} (0,37 * v * T_u + 3,14) \quad (2.4)$$

mit

- DR Zugluftrisiko (Draft Risk) in %
- θ_L lokale Lufttemperatur in °C ($19 \text{ °C} < \theta_L < 27 \text{ °C}$)
- v lokale mittlere Luftgeschwindigkeit in m/s
- T_u Turbulenzgrad in %

In Abb. 2.4 sind die Anforderungen nach DIN EN 13779 (15 % DR Zugluftrisiko) dargestellt.

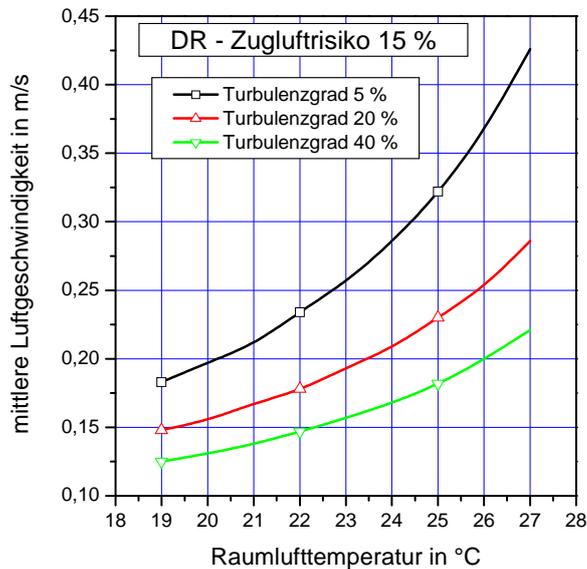


Abb. 2.4 Zulässige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Turbulenzgrad nach DIN EN 13779 (Zugluftrisiko 15 %)

Die Anforderungen an die Luftgeschwindigkeit sind nach FINKE (2006) vergleichbar mit den Anforderungen der früheren DIN 1946 Teil 2.

2.3 Raumklima und Leistungsfähigkeit

Die Temperatur im Raum hat einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Menschen (siehe SEPPÄNEN, FISK (2004)). Die Auswertungen ergeben bei Temperaturen über 25 °C im Mittel einen Leistungsabfall von 2 % je K, bei Temperaturen unter 21 °C einen Abfall von 4 % je K Temperaturänderung. In Abb. 2.5 sind die Ergebnisse verschiedener Forschungen und die daraus ermittelte Näherung von SEPPÄNEN, FISK (2004) aufgetragen.

Inzwischen wurden die Ergebnisse weiterverarbeitet von Wargocki und Seppänen im REHVA Guidebook 6 (2006).

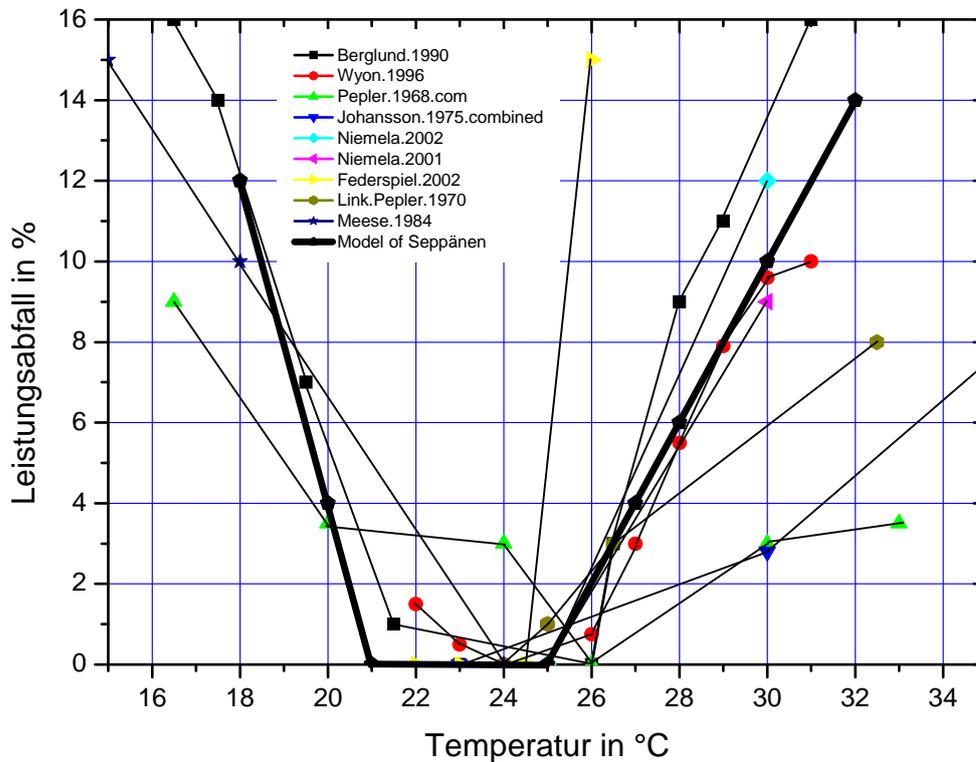


Abb. 2.5 Experimentelle Ergebnisse zu Raumklima und Leistungsfähigkeit (nach SEPPÄNEN, FISK 2004)

2.4 Hygiene

Hygieneanforderungen in Normen oder Richtlinien an frei belüftete Räume sind nicht bekannt. Eine Verbesserung der Luftqualität durch maschinell betriebenen Luftaustausch und eine Abscheidung von Verunreinigungen der in den Raum eingebrachten Luft durch Filterung, wie das bei raumlufttechnischen Anlagen üblich ist (VDI 6022 bzw. DIN EN 13779), findet bei freier Lüftung nicht statt. Der Raumnutzer lüftet durch Fensterlüftung und verbessert dadurch die Luftqualität im Raum. Das ist allerdings nur erfolgreich, wenn die Außenluftqualität besser als die Raumluftqualität ist. Er muss das Fenster schließen und damit auf eine Lüftung des Raumes verzichten, wenn die Luftqualität außen kurzfristig schlechter ist. Dabei wird ein Anstieg der CO₂-Konzentration in Kauf genommen. Die Luftqualität im Raum verschlechtert sich (siehe Abb. 2.2).

Die Raumreinigung spielt für die Feinstaubkonzentration im Raum eine wichtige Rolle. Die Reinigungsintervalle für die Räume werden durch den Betreiber festgelegt. Zu große Reinigungsintervalle können erhöhte Feinstaubkonzentrationen zur Folge haben.

2.5 Akustik

Akustische Anforderungen an Arbeitsplätze werden in der Arbeitsstättenverordnung nicht detailliert festgelegt, sondern es wird eine generelle Begrenzung des Schalldruckpegels allgemeingültig festgelegt. Demnach darf der Schalldruckpegel unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Geräusche höchstens 85 dB(A) betragen. Für Büroarbeitsplätze ist diese Maximalbegrenzung unzumutbar. Für klimatisierte Büros werden Werte von 35 dB(A) und 40 dB(A) vorgegeben (z. B. DIN EN 13779 (2007)).

3 Physikalische Grundlagen der freien Lüftung

3.1 Thermische Lasten

Personen, Beleuchtung, Rechner und ähnliche Geräte und die Strahlung durch die Fenster sind die wesentlichen thermischen Lastenquellen im Büro. Bei optimierter Beleuchtung, kleiner Leistung der elektrischen Geräte und gutem Sonnenschutz sind thermische Lasten um 25 W/m^2 in einem Büro möglich, in vielen Fällen liegen sie aber höher, im Bereich bis zu 100 W/m^2 (s. z. B. Tabelle 5.1 und 5.4). In dicht belegten Versammlungsräumen liegt die thermische Last allein durch die Personen schon in der Größenordnung von 100 W/m^2 .

3.2 Auftriebs- und Windkräfte

Die Druckdifferenz für die freie Lüftung am Raum oder am Gebäude entsteht entweder durch Winddruck, durch den Auftrieb infolge von Temperaturunterschieden zwischen innen und außen oder aus einer Überlagerung von beiden. Wind sorgt für Über- und Unterdruckzonen auf der Luv- und Leeseite des Gebäudes.

Schon an einem geometrisch sehr einfachen Gebilde, einem senkrecht stehenden Quader erzeugt der Wind bei freier Anströmung Unter- und Überdrücke, wie sie in Abb. 3.1 für verschiedene Windrichtungen in Form von Druckbeiwerten dargestellt sind.

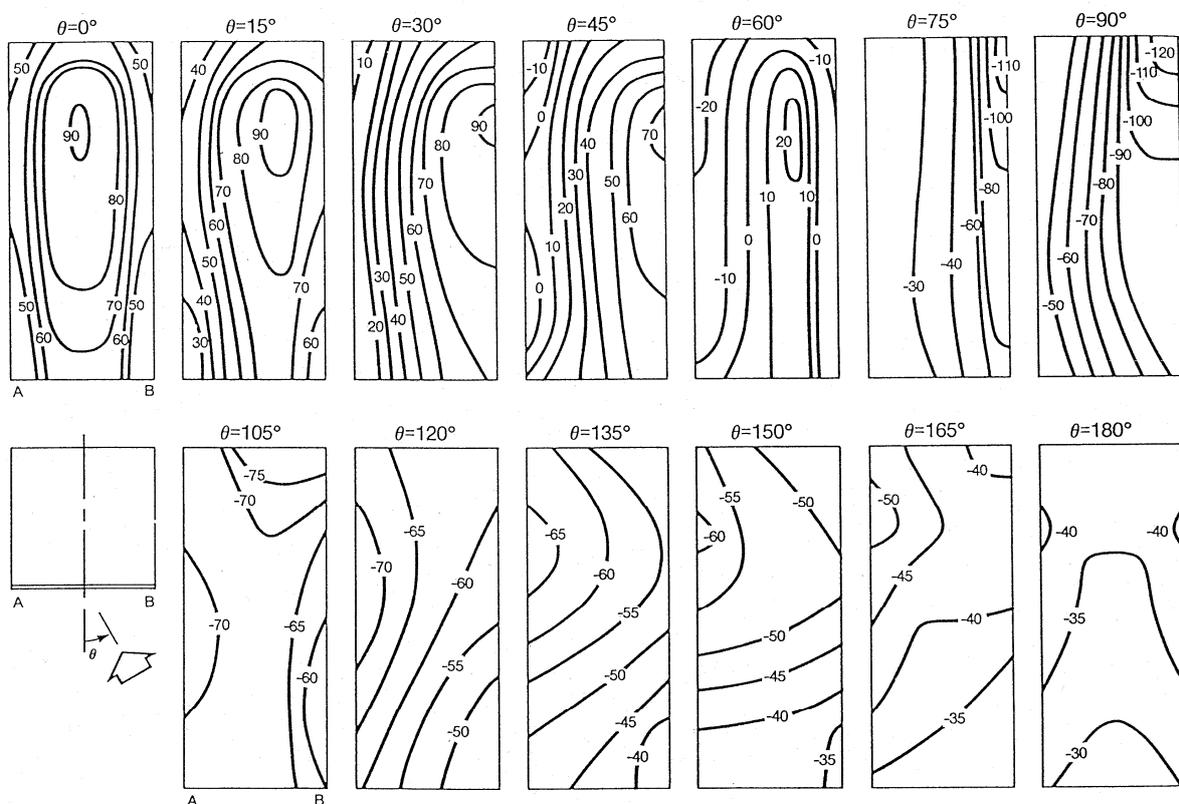


Abb. 3.1 Druckbeiwerte c_p in % für einen aus verschiedenen Richtungen \ominus angeströmten Quader (ASHRAE)

Der Druckbeiwert c_p stellt den örtlichen Über- oder Unterdruck an der Fassade gegenüber dem Innenraum bezogen auf den dynamischen Druck des Windes dar, der in der ungestörten Strömung in 10 m Höhe über dem Boden gemessen wird.

$$c_p = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} w^2} \quad (3.1)$$

Δp Druckdifferenz außen – innen
 ρ Dichte der Luft
 w Geschwindigkeit der ungestörten Windströmung

Beim Anströmwinkel $\Theta = 0$ ergibt sich zum Beispiel in der Mitte des oberen Gebäudeviertels ein Wert von 90 %, in der vorderen oberen Ecke der seitlichen Fläche einer von -120 %. Wenn ein Raum zwischen diesen beiden Teilflächen der Fassade liegt, besteht eine Druckdifferenz am Raum von

$$\Delta p = \frac{90 - (-120)}{100} * \frac{\rho}{2} w^2 \quad (3.2)$$

Bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s ergibt das eine Druckdifferenz von

$$\Delta p = 2,1 * \frac{1,2}{2} * 100 = 126 \text{ Pa} \quad (3.3)$$

Reibungsverluste und Öffnungsquerschnitte auf dem Strömungsweg bestimmen die Durchströmung des Gebäudes. Der Einfluss des Windes wird deshalb im Allgemeinen dadurch geregelt, dass die Fenster und Türen von den Raumnutzern entsprechend geöffnet oder geschlossen werden. Zu starker Wind ist weniger problematisch als zu geringer. Fenster für freie Lüftung sollten deshalb mit einem Motor oder einem Getriebe fein einstellbar² sein und sehr kleine, aber auch große Öffnungsquerschnitte erlauben. Das wird zusätzlich durch Fenster mit verschiedenen großen Fensterflügeln ermöglicht.

Bei freier Lüftung findet die Be- und Entlüftung durch Türen, Fenster oder andere oft nicht speziell für die Lüftung konzipierte Öffnungen statt. Die freie Lüftung hat dabei keinen zeitlich konstanten Antrieb. An warmen, windstillen Sommertagen kann der Antrieb gegen null gehen, an einem kalten Wintertag oder bei starkem Wind kann der Druckunterschied sehr groß sein. Das ist einer der großen Nachteile der freien Lüftung.

Häufig wird angenommen, dass Fensterlüftung in Hochhäusern wegen des Winddruckes nicht möglich sei. Viele Hochhäuser mit Fensterlüftung beweisen das Gegenteil. Die Fenster müssen dicht genug schließen, sie müssen aber nicht absolut dicht sein. Bei hoher Windstärke und geschlossenen Fenstern sollte gerade der Mindestluftwechsel eintreten.

² z. B. Fa Winkhaus: Du Top: Einstellung mit Getriebe und Hebelstange

Für unsere Aufgabenstellung ist der Einfluss des Windes, so komplex seine Wirkung auf die Durchströmung auch ist, weniger wichtig, weil angenommen werden darf, dass bei störendem Wind die Fenster entsprechend geschlossen werden können. Das Gebäude muss innen von Raum zu Raum und vor allem von Geschoss zu Geschoss möglichst dicht sein, weil die Nutzer hier kaum Einfluss nehmen können.

Besonders im Winter treten neben den Windkräften Auftriebskräfte auf. Sie ergeben sich aus der unterschiedlichen Dichte der Luft innerhalb und außerhalb des Gebäudes. Eine Luftsäule mit der Höhe H hat ein Gewicht G von

$$G = \rho * g * H \quad (3.4)$$

Vergleicht man die Luftsäule außen mit einer Dichte ρ_1 mit der Säule innen mit ρ_2 , so beträgt die Gewichts­differenz

$$G = (\rho_1 - \rho_2) * g * H \quad (3.5)$$

Dabei wird im Prinzip Mischströmung angenommen, denn über die gesamte Höhe wird innen ρ_2 angenommen.

Bei einer Temperaturdifferenz von 30 K zwischen innen und außen beträgt die Dichtedifferenz 10 % der Dichte also $0,12 \text{ kg/m}^3$. Bei einem 100 m hohen Gebäude ergibt sich damit eine Gewichts­differenz von

$$G = 0,12 * 9,81 * 100 \approx 120 \text{ N} \quad (3.6)$$

Die Druckdifferenz von 120 Pa liegt in der gleichen Größenordnung wie die Druckdifferenz durch starken Wind.

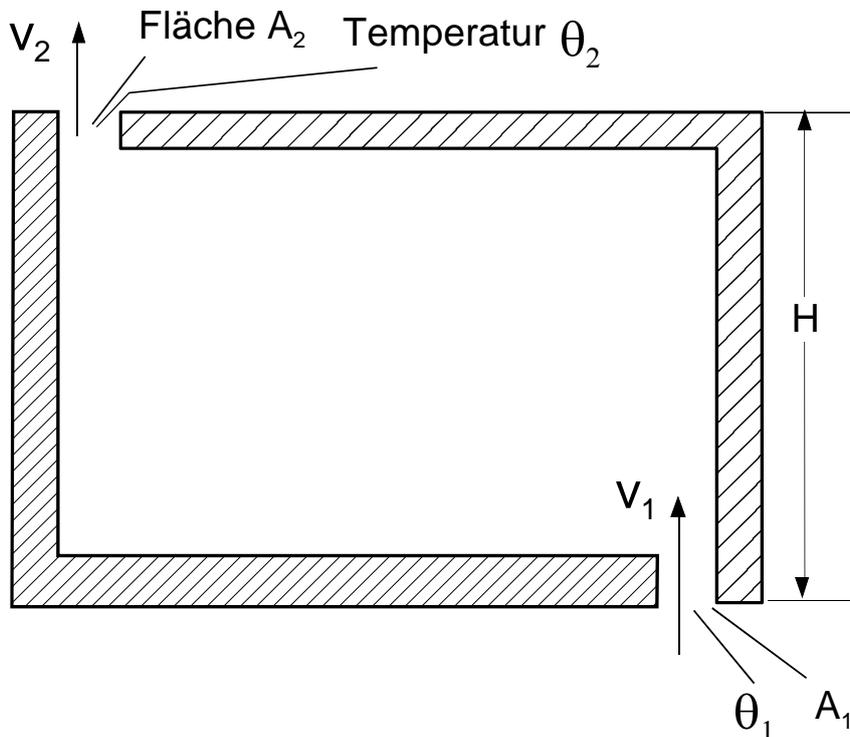


Abb. 3.2 Lüftung durch thermischen Auftrieb

Abb. 3.2 zeigt, welche Geschwindigkeiten sich an einem Raum mit je einer Öffnung oben (Index 2) und unten (Index 1) bei den Flächen A , den Temperaturen Θ , der absoluten Temperatur T und der Höhe H (Gleichung 3.7) einstellen. Die Volumenströme ergeben sich mit Gleichung 3.8.

$$v_2 = \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (\Theta_2 - \Theta_1)}{T \cdot (1 + A_2^2 / A_1^2)}} \quad (3.7)$$

$$q = A_2 \cdot v_2 = A_1 \cdot v_1 \quad (3.8)$$

Nicht berücksichtigt ist bei diesem Bild, dass die Strömungsöffnungen durch eine Einschnürung kleiner sind als die geometrische Öffnung. Dieser Einschnürungsfaktor m liegt je nach Strömungsgeschwindigkeit und Abmessung zwischen $m = 0,5$ und $0,8$.

Man erkennt, dass bei gleichen Flächen A_1 und A_2 die Luftgeschwindigkeit an den Öffnungen nur von der Höhendifferenz zwischen den Öffnungen und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen abhängt.

Falls sich im Raum eine Wärmequelle befindet, die den Wärmestrom Φ abgibt, stellt sich bei den Bedingungen von Abb. 3.2 bei einem Volumenstrom q eine bestimmte Temperaturdifferenz ein.

Da

$$\Phi = \rho \cdot q \cdot c_p \cdot (\Theta_2 - \Theta_1) \quad (3.9)$$

ergibt sich

$$(\Theta_2 - \Theta_1) = 0,033 \cdot \sqrt[3]{\frac{\Phi^2}{A^2 \cdot H}} \quad (3.10)$$

Erweitert man mit der Grundfläche des Raumes A_g und bezieht die Wärmeleistung Φ auf die Grundfläche A des Raumes

$\varphi = \frac{\Phi}{A_g}$, so ergibt sich

$$(\Theta_2 - \Theta_1) = 0,033 \cdot \sqrt[3]{\frac{\varphi^2}{\frac{A^2}{A_g^2} \cdot H}} \quad (3.11)$$

mit φ als bezogenen Wärmestrom und A/A_g als die auf die Grundfläche bezogene Öffnungsfläche.

Wenn die Temperatur nicht gleichmäßig über der Höhe verteilt ist, muss der Mittelwert gebildet werden. Darauf weist LIEB hin. Abb. 3.3 stellt drei mögliche Tempera-

turverläufe als Funktion der Höhe dar, wie sie beispielsweise in Atrien als Funktion der Höhe auftreten können. In der Darstellung ist die Temperatur bezogen auf die Temperaturdifferenz Δt zwischen Austritt und Eintritt und die Höhe bezogen auf die Höhendifferenz Δh zwischen Austritt und Eintritt als $f(h)$ dargestellt. Lieb nennt das Ergebnis „Das Höhenintegral der Dichteunterschiede“. In der Tat kann man den Absolutwert des Temperaturintegrals dem Dichteintegral gleichsetzen. Und man kann deshalb bei nicht konstanter Temperatur- bzw. Dichteverteilung anstelle der Temperaturdifferenz Δt zwischen Abluft- und Zuluftöffnung die mittlere Temperaturdifferenz $\overline{\Delta t}$ einsetzen.

$$\overline{\Delta t} = \int_0^1 f(h) dh = \overline{f} \cdot \Delta t \quad (3.12 a)$$

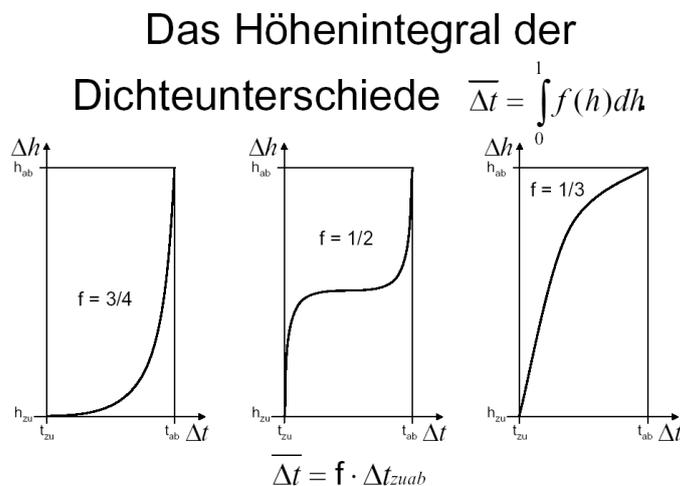


Abb. 3.3 Drei Beispiele für den Einfluss von Temperaturprofilen auf den thermischen Auftrieb (LIEB)

In der hier gewählten Nomenklatur müsste es so lauten:

$$\overline{\Delta \Theta} = \overline{f} \cdot \Delta \Theta = \int_0^1 f(h) dh \quad (3.12 b)$$

Für die drei Fälle liegt f bei $\frac{3}{4}$; $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{3}$. Bei Mischlüftung ist dieser Effekt zu vernachlässigen ($f \approx 1$). Bei Räumen mit Fensterlüftung ist mit $0,7 < f < 1,0$ zu rechnen.

3.3 Gebäudedurchströmung

Ein Gebäude, dessen Geschosse nicht luftdicht voneinander getrennt sind, wird als Schachttypgebäude bezeichnet. Die Schachtwirkung wird durch die Skizze in Abb. 3.4 (nach DIN 4701) veranschaulicht. Die Verbindungen können durch Treppenhäuser, Technik- und Aufzugsschächte oder Atrien entstehen. Wenn in solchen Gebäuden die Temperatur innen höher als außen ist, bildet sich wie beim einzelnen Raum eine Druckdifferenz Δp von unten nach oben aus, die zu der Dichtedifferenz $\Delta \rho$ der Luft außen und innen und der Gebäudehöhe h proportional ist:

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot g \cdot h \quad (3.13)$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot |\Delta \Theta / T| \quad (3.14)$$

Die Höhendifferenz h ist der vertikale Abstand zwischen oberer und unterer Öffnung. $\Delta \Theta$ ist die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und T die absolute Temperatur.

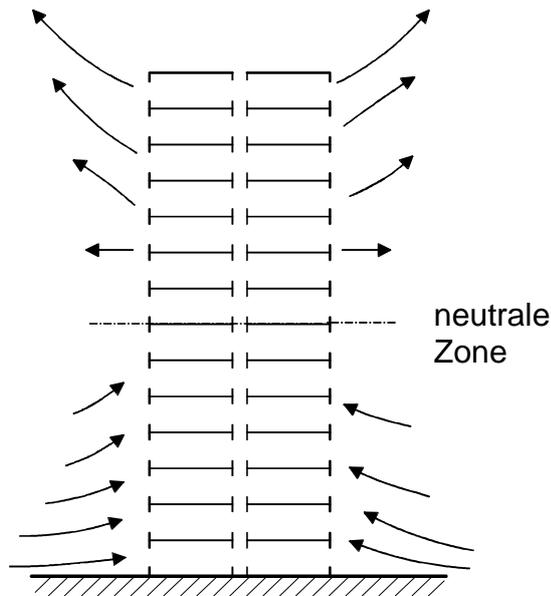


Abb. 3.4 Schachttypgebäude

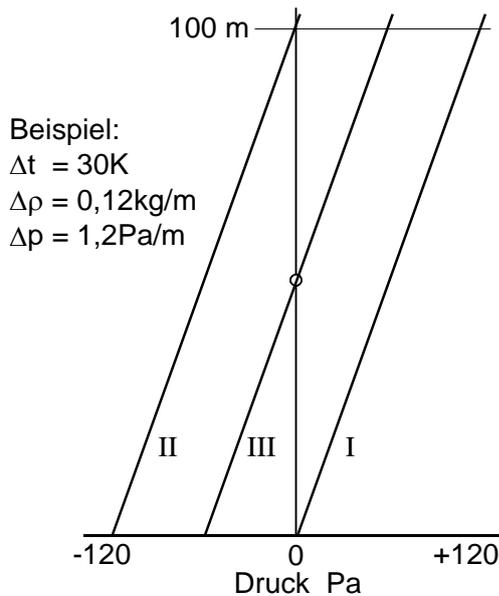


Abb. 3.5 Druckverteilung am Schachttypgebäude

Die Druckdifferenz ist mit der Temperaturdifferenz gegeben. Die Druckverteilung in verschiedenen Gebäudehöhen hängt davon ab, wie die Undichtigkeiten der Gebäudehülle verteilt sind. Drei Grenzfälle sind in Abb. 3.5 eingezeichnet. Wenn das Gebäude vollkommen dicht ist und nur unten eine Öffnung hat, tritt die Druckverteilung (I) von Abb. 3.5 ein. Unten ist kein Druckunterschied gegenüber außen, oben ist er am größten. Der umgekehrte Fall tritt ein, wenn ein dichtes Gebäude eine Öffnung oben hat (II). Weil im Mittel die Undichtigkeiten eines wirklichen Gebäudes über der Oberfläche gleichmäßig verteilt sind, tritt die Verteilung (III) am häufigsten auf. Unterdruck unten, Überdruck oben. In Gebäudemitte besteht kein Druckunterschied, eine neutrale Zone. In diesem Fall strömt Luft im unteren Teil des Gebäudes ein, durchströmt es von unten nach oben und verlässt das Gebäude oben wieder. Die schlechteste Luftqualität findet man deshalb oben im Gebäude, wenn in den unteren Geschossen entsprechende Verunreinigungsquellen sind. Deshalb sollten Nichtraucheretagen auch nicht in den oberen Geschossen vorgesehen werden, wie man es häufig antrifft. In den mittleren Geschossen findet nur geringer Luftaustausch statt. Oben strömt die Luft überwiegend nur durch die Fenster nach außen.

Um das Überströmen der Luft aus den unteren in die oberen Geschosse zu vermeiden, können Abzugschächte aus den einzelnen Geschossen bis zum Dach vorgesehen werden, wie auf Abb. 3.7 dargestellt.

Ein großer Vorteil der freien Lüftung ist die Möglichkeit, zu Zeiten angenehmer Außenklimabedingungen verhältnismäßig große Außenluftwechsel im Raum mit entsprechend guter Luftqualität ohne Energieaufwand zu erzielen. Das setzt entsprechend gute Außenluftqualität und niedrige Lärmpegel außen voraus. Die freie Lüftung ist bei Außentemperaturen zwischen 12 °C und 20 °C (FITZNER, 2001) möglich.

Die freie Lüftung ist am ehesten problematisch, wenn kein Wind weht und Außen- und Innentemperaturen ungefähr gleich groß sind. Für diesen Fall sollten möglichst große Fensteröffnungen zur Verfügung stehen, um ausreichenden Luftwechsel auch bei kleinsten Temperaturdifferenzen und Windgeschwindigkeiten zu erreichen.

Abb. 3.6 zeigt den vereinfachten Grundriss eines eingeschossigen Hauses mit freier Lüftung. Es sollte so ausgerichtet sein, dass die Räume mit der besseren Luftqualität zur häufigsten Windrichtung hin ausgerichtet sind, also im Allgemeinen nach West oder Nordwest.

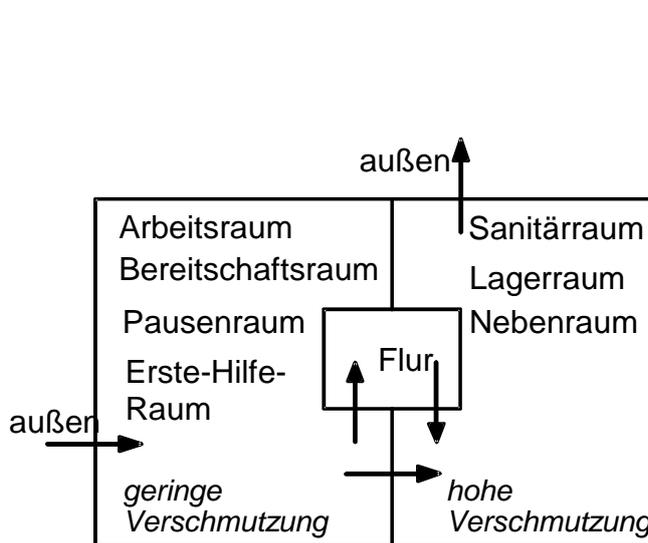


Abb. 3.6 Ausrichtung eines eingeschossigen Hauses

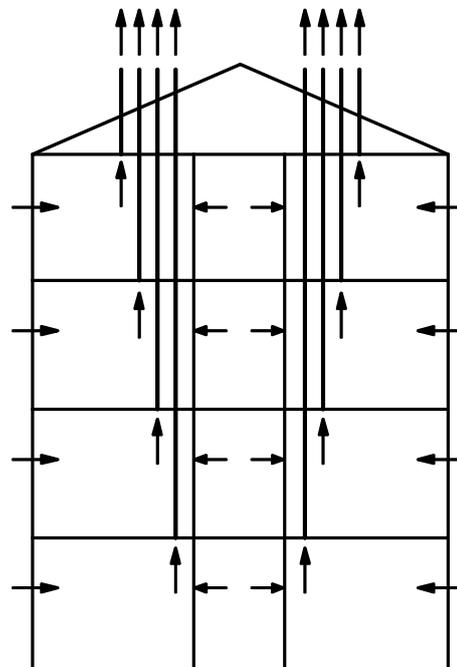


Abb. 3.7 Schächte für die freie Lüftung in einem Gebäude mit mehreren Geschossen

Der thermische Auftrieb ist beim eingeschossigen Haus oder einer nach oben und unten dichten Etage nicht besonders groß ($< 5 \text{ Pa}$). Bei Windstille ist er allerdings die einzige treibende Kraft für den Luftaustausch, und deshalb müssen hier vor allem im Sommer große Fenster geöffnet werden können, wenn die Außentemperatur über der Innentemperatur liegt. Das sieht anders aus bei mehrgeschossigen Häusern. Abb. 3.7 zeigt, wie die Thermik bei freier Lüftung durch senkrechte Schächte aus den einzelnen Etagen zur Lüftung genutzt werden kann. Wenn die Strömungswiderstände dieser Schächte klein sind gegenüber den Widerständen auf den anderen Strömungswegen durchs Gebäude, dann findet kein Überströmen zu den höheren Geschossen statt.

Gebäude für freie Lüftung benötigen Schächte und Abschottungen und Regeleinrichtungen.

Bei Doppelfassaden entstehen vor allem an Sommertagen auch ähnlich große Auftriebskräfte durch die Erwärmung des Raumes zwischen den Scheiben. Die Auftriebskräfte nehmen mit der Wurzel aus der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und mit der Höhendifferenz zwischen den Ein- und Austrittöffnungen zu (s. Gl. 3.6). An einem 100 m hohen Gebäude entsteht bei 30 K Temperaturunterschied an einem von unten bis oben durchgehenden Schacht eine Druckdifferenz von 120 Pa, vergleichbar mit dem Staudruck bei Windgeschwindigkeiten von 10 m/s bis 14 m/s, also etwa Windstärke 5 bis 6. Deshalb sollten Gebäude, die für freie Fensterlüftung vorgesehen sind, möglichst keine offenen Schächte zwischen Räumen in verschiedenen Höhen haben. Treppenhäuser, offene Innenräume, Schächte, vor allem Aufzugsschächte müssen durch entsprechende Schleusen abgeschottet sein.

Andererseits kann die Schachtwirkung erwünscht sein, damit an windstillen Sommertagen eine Gebäudedurchströmung ermöglicht wird. Die Schächte sollten aber über regulierbare Öffnungen verfügen. Am angebrachtsten sind Einzelschächte, die die Räume einzeln nach oben mit der Umgebung verbinden.

3.4 Raumdurchströmung bei geöffnetem Fenster

Die Raumströmung bei geöffnetem Fenster entsteht durch Winddruck und thermischen Auftrieb. Bei zu großem Winddruck werden die Fenster geschlossen. Deshalb soll für die Ermittlung der Einsatzgrenzen der kritischere Fall betrachtet werden, bei dem der Luftaustausch durch das Fenster nur aufgrund von Thermik stattfindet.

Bis auf wenige Ausnahmen ist die Umgebungstemperatur niedriger als die Raumtemperatur, und so stellt sich durch den Dichteunterschied der Luft ein Druckunterschied zwischen außen und innen ein. Daraus entsteht bei geöffneten Fenstern ein Luftaustausch zwischen außen und innen.

Über den unteren Teil der Öffnungsfläche strömt Außenluft mit geringem Impuls in den Raum. Bei gekipptem Fenster bildet sich an den Seiten des Fensters je ein Zuflussstrahl aus (ZEIDLER, 2001). Die eintretende Luft fällt zu Boden und vermischt sich dabei je nach Weglänge bis zum Boden mehr oder weniger mit der Raumluft. Die Luft bewegt sich dann parallel zum Boden bis zu den Wärmequellen im Raum. Das sind vor allem Personen, aber auch andere Wärmequellen und auch die Wände, die durch Strahlung erwärmt werden. An diesen Wärmequellen wird die Luft nach oben gefördert. Sie erreicht schließlich die Decke und strömt parallel zur Decke zu den Fensteröffnungen. Über den oberen Teil des Fensters verlässt sie den Raum wieder. Der ein-, austretende Massenstrom ist gleich groß. Die Abb. 3.8 skizziert qualitativ den Verlauf der Raumluftströmung bei geöffnetem Fenster nach ZEIDLER, FINKE, FITZNER (2004).

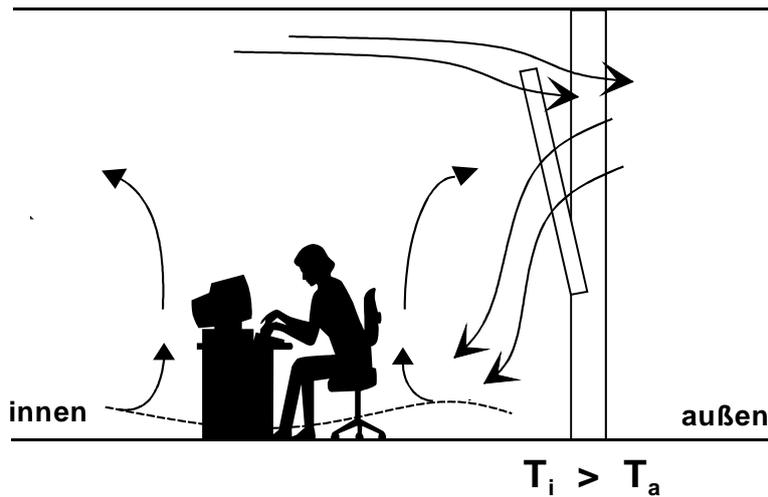


Abb. 3.8 Raumströmung bei Fensterlüftung

Im Raum stellt sich nahezu eine Quellluftströmung mit einer Zuluftschicht in Bodennähe ein. Die Wärmequellen fördern durch ihre Auftriebsströmung Luft aus Bodennähe nach oben. Aus der Luftschicht unter der Decke des Raums gelangt die Luft über den oberen Teil der Fensteröffnung nach außen.

Über die Strömung am Kippfenster gibt es weitere zahlreiche Untersuchungen in der Literatur, die allerdings immer andere Aufgabenstellungen hatten, als die größte behaglich einzubringende Kühlleistung zu ermitteln. HEISELBERG et al. (2001) haben Kipp- und Drehflügelfenster auch im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit im Winter untersucht und kommen zu dem Ergebnis, dass Kippfenster mit der größten Öffnung oben auf jeden Fall besser geeignet sind als Drehflügelfenster.

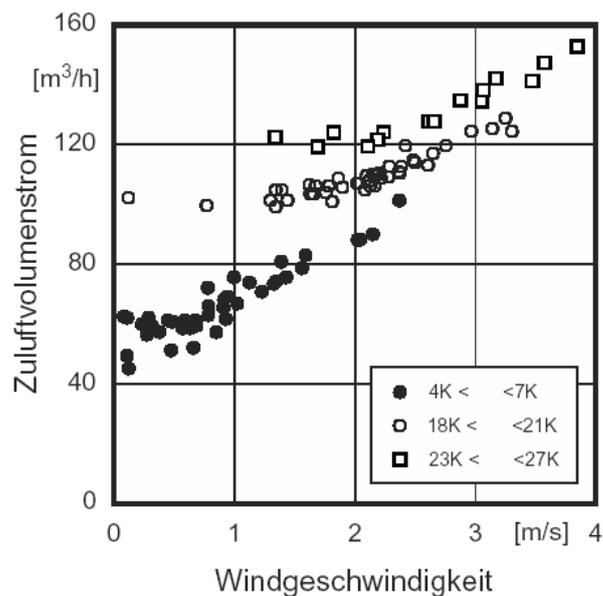


Abb. 3.9 Zuluftvolumenstrom an einem Kippfenster bei verschiedenen Temperaturdifferenzen und Windgeschwindigkeiten (MAAS)

Der kombinierte Einfluss von Thermik und Wind für einen Raum mit Kippfenstern wird von MAAS angegeben. Das Ergebnis wird in Abb. 3.9 wiedergegeben. Wie zu erwarten, ist bei kleinen Windgeschwindigkeiten der Einfluss Temperaturdifferenzen bestimmend, erst bei höheren Windgeschwindigkeiten über 4 m/s dominiert der Einfluss des Windes. Aber in jedem Fall steigert Wind den Zuluftvolumenstrom, was durch Verringerung der Fensteröffnung kompensiert werden kann.

Bei 3 m Raumhöhe und einer Temperaturdifferenz von 30 K entsteht eine Druckdifferenz von knapp 4 Pa, der dynamische Druck des Windes ist bei einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s ungefähr genauso groß (s. Gl. 3.1 für $c_p = 1$).

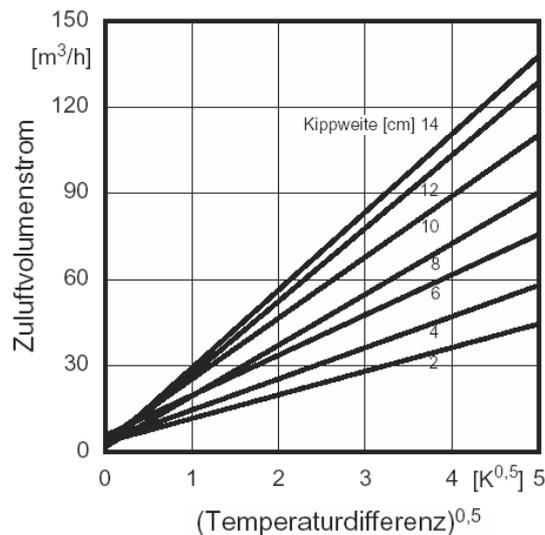


Abb. 3.10 Zuluftvolumenstrom bei verschiedenen Kippweiten (MAAS)

Weiterhin untersucht MAAS, welchen Einfluss die Kippweite, das ist der lichte Abstand der Fensterrahmen an der Oberseite, auf den Volumenstrom hat (siehe Abb. 3.10 und auch Abb. 5.6). In erster Näherung würde man annehmen, dass der Volumenstrom proportional zu der Kippweite ist. Das ist aber bei geringer Öffnung nicht der Fall, weil Kippfenster bei geringer Öffnung wegen der Rahmendicke im unteren Bereich eine starke Versperrung der Öffnung aufweisen. Das hängt von der jeweiligen Konstruktion der Rahmen ab. Ab einer Kippweite von 2 cm ist der Volumenstrom ungefähr proportional zur Kippweite. Bei linearer Extrapolation ergäbe eine Kippweite null schon einen Volumenstrom von 26 m³/h. Bei Beginn der Öffnung steigt der Volumenstrom schneller an.

Es wäre vielleicht angebracht, genauere Daten über die Öffnung für jedes Fenster zu fordern, wenn nicht ein weiterer Effekt eine Rolle spielte, den MAAS auch dargestellt hat. Es ist der Einfluss einer Fensterlaibung. Eine Fensterlaibung, die in Form eines Rahmens um das Kippfenster gebaut wurde, wie in Abb. 3.11 dargestellt, reduziert den Zuluftvolumenstrom etwa auf die Hälfte.

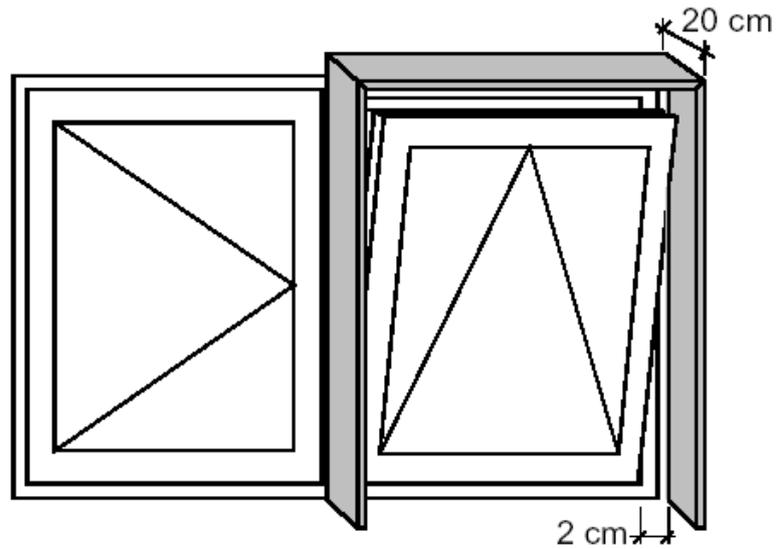


Abb. 3.11 Versuchsanordnung zur Ermittlung des Einflusses einer Fensterlaibung

HALL hat die Geometrie des Kippfensters genauer untersucht. Abb. 3.12 zeigt die charakteristischen Abmessungen eines Kippfensters.

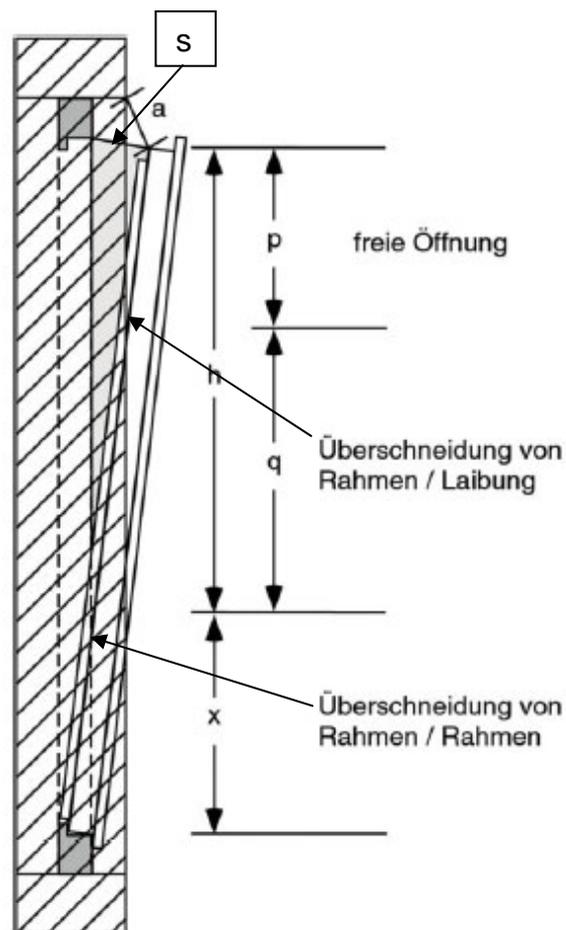


Abb. 3.12 Geometrie des Kippfensters: Einfluss des Rahmens und der Laibung auf den freien Querschnitt

Bis zur Höhe x besteht eine Überschneidung von feststehendem und gekippten Rahmen. Bis zur Höhe $x + q$ besteht eine Überschneidung von Rahmen und Laibung und erst darüber entsteht eine freie dreieckige Öffnung. Im Bereich der Überschneidungen ist der Rahmen nicht geschlossen, aber der Querschnitt ist eingeschränkt.

Der Vergleich der Volumenströme verschiedener Kippfenster mit sehr unterschiedlichen Abmessungen bei einer Temperaturdifferenz von 20 K und einer Kippweite von 70 mm dargestellt in Tab. 3.1. (Hier wird auch schon das Ergebnis unserer Untersuchung mit berücksichtigt). Trotz der unterschiedlichen Abmessungen ergeben sich verhältnismäßig ähnliche Werte (vorletzte Spalte). Eine noch bessere Näherung ergibt sich, wenn die Volumenströme geteilt werden durch die Fensterhöhe mit einem Exponenten von 1,5. Man erkennt daran, dass die Volumenströme nicht einfach proportional zur Fensterfläche sind, sondern dass die Höhe stärkeren Einfluss hat. Eine genaue analytische Ableitung wird von DALER et al. (1984) gegeben.

Tab. 3.1 Volumenströme an verschiedenen Kippfenstern,
 $\Delta t = 20 \text{ K}$, $k = a = 70 \text{ mm}$

Autor	Höhe in m	Breite in m	Volumenstrom q in m^3/h	$q/H^{1,5}$
Maas	1,33	1,98	70	46
Zeidler	2,10	0,67	160	53
Blum	1,2	1,00	55	42
Dahler	1,2	1,00	≈ 60	46
Hall	0,94	1,23	54 - 92	41-70
Klimakonzept	1,48	0,71	120	67
Relative Standardabweichung			0,46	0,23

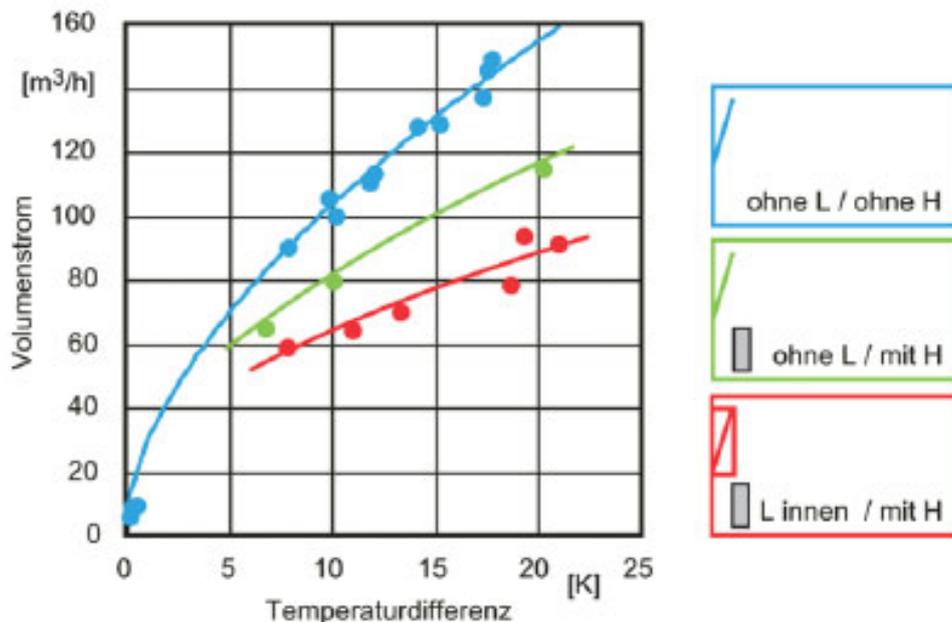
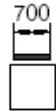
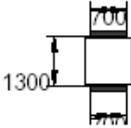


Abb. 3.13 Einfluss von Laibung und Heizung auf den Zuluftvolumenstrom nach HALL für eine Kippweite von 100 mm

HALL hat versucht, die verschiedenen Einflüsse, wie Überdeckung des Rahmens und der Laibung, ja sogar der Heizung zu untersuchen, und eine Näherungsgleichung für den Zuluftvolumenstrom aufzustellen. Abb. 3.13 zeigt einige Ergebnisse für eine Kippweite von 100 mm. Die Ergebnisse ermutigen eher, mit einfachen Abschätzungen zu arbeiten, weil schon der Einfluss der Heizung eine Minderung des Volumenstromes von 23 % ausmachen kann.

DALER gibt Volumenströme für vertikale und horizontale Lüftungsschlitze, sogenannte Dauerlüfter, mit einer Fläche von 0,01 m² bei einer Temperaturdifferenz von 15 K an (siehe Tab. 3.2). Bei Anbringung an nur einer Raumseite ergeben die Schlitze zu niedrige Volumenströme. Er gibt auch Zahlenwerte in Form von Luftwechseln eines 40 m³ großen Raumes für ein einflügeliges Fenster 1,0 m x 1,2 m für verschiedene Fugendurchlasskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturdifferenzen an.

Tab. 3.2 Luftaustausch durch „Dauerlüfter“ (DALER)

Anordnung der Lüftungseinrichtungen	Temperaturbedingter Volumenstrom durch Fugenundichtigk.		Gesamtvolumenstrom $\dot{V}_L + \dot{V}_{RLE}$ in m ³ /h	Luftwechselzahl n (bei $V_R = 40\text{m}^3$) in 1/h
	\dot{V}_L in m ³ /h	Dauerlüfter \dot{V}_{RLE} in m ³ /h		
 Horizontale Einzelöffnung	6,5	1,5	8,0	0,2
 Vertikale Einzelöffnung	6,5	7,0	13,5	0,3
 Zwei vertikale Öffnungen	6,5	14,5	21,0	0,5

Tab. 3.3 Luftwechsel (DALER)

Temperaturdifferenz in K	Luftwechsel in h ⁻¹ bei Fugendurchlasswerten a von			
	0,1 m ³ /(hm)	1 m ³ /(hm)	2 m ³ /(hm)	5 m ³ /(hm)
8	0	0,02	0,04	0,09
13	0	0,02	0,05	0,12
26	0	0,03	0,06	0,17

Man erkennt, dass auch diese Werte sehr niedrig sind und Spaltlüftung der Fenster allein kaum ausreichend sein kann.

3.5 Raumtemperatur und maximale thermische Lasten

3.5.1 Sommerfall

Neben der Gebäudedurchströmung sind bei Fensterlüftung die thermischen Lasten zu beachten. Sie sind nach oben begrenzt. Für den Sommerfall ergibt sich die Grenze durch die zu erwartenden Temperaturen im Raum. Immer wenn die inneren Lasten über 30 W/m^2 liegen, werden die Temperaturen zu hoch. Dann werden entweder RLT-Anlagen benötigt oder es müssen unbehagliche Raumlufttemperaturen in Kauf genommen werden. Dazu gibt es Berechnungen für die Überschreitungzeiten einer Temperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in Räumen mit unterschiedlichen inneren und äußeren Lasten (ROUVEL, KOLMETZ). Abb. 3.14 gibt eine zusammenfassende Darstellung einiger Ergebnisse wieder für eine Überschreitungszeit von 10 % der Bürozeit.

Es wird die zulässige maximale innere Last über dem Glasflächenanteil der Fassade für verschiedene Fassadenausrichtungen und Sonnenschutzeinrichtungen dargestellt. Danach ist bei großem Glasanteil sogar ein Sonnenschutz bei Nordorientierung angebracht. Innen liegender Sonnenschutz ist nur bei kleinem Glasflächenanteil nicht wesentlich schlechter als außen liegender.

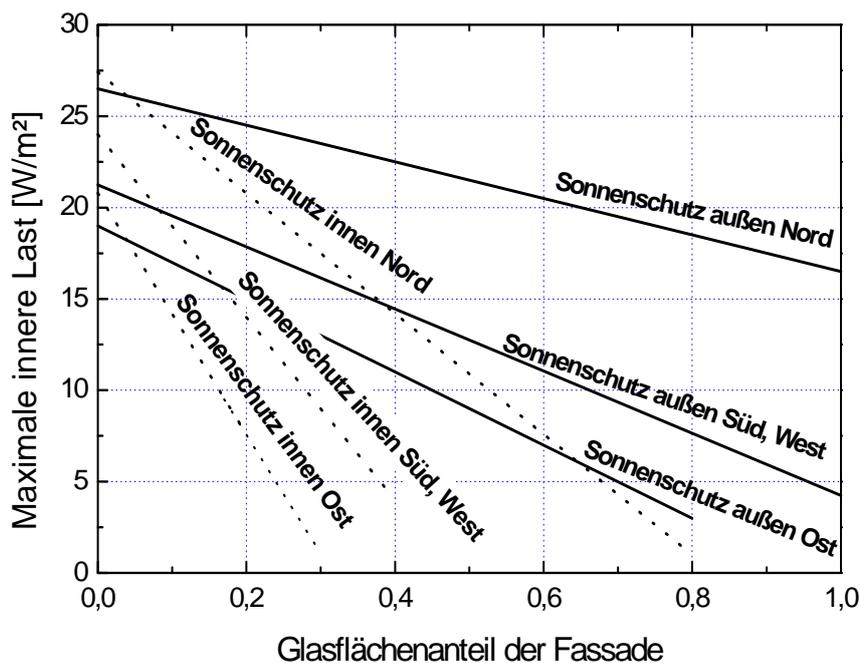


Abb. 3.14 Maximale innere Lasten für Überschreitung von 25°C in 10 % der Bürozeit

Man erkennt, dass eine voll verglaste Fassade bei Nordorientierung selbst bei innerem Blendschutz keine inneren Lasten zulässt, und eine mit 50 % Verglasung nur 10 W/m^2 . Mit äußerem Sonnenschutz reduziert sich die bezogene äußere Last etwa auf 10 %, so dass bei Süd-, West- und Ostorientierung auch innere Lasten von etwa 10 W/m^2 zulässig sind bei einem Glasflächenanteil von 50 %. Wenn zusätzlich gekühlt wird, lässt sich die aufgebrachte Kühlung nicht einfach als zulässige zusätzliche

innere Last betrachten, aber immerhin dürfen die inneren Lasten dann mit Sonnenschutz etwa 25 W/m^2 betragen.

Die Gebäude mit verhältnismäßig niedrigen inneren thermischen Lasten werden in Zukunft vor allem deshalb leichter zu realisieren sein, weil die Möglichkeiten der Regelungstechnik erheblich verbessert werden. Dann ist es leichter als heute möglich, die zu regelnden Gebäudeparameter besser zu erfassen und zu beeinflussen. Das Zusammenspiel der Tageslichtlenkung, des Sonnenschutzes, der Lichtregelung, der nächtlichen Fensteröffnung, der Fensteröffnung zur freien Belüftung lässt sich erfassen und optimal aufeinander abstimmen. Man kann sich vorstellen, da auf diesem Gebiet ein neues Betätigungsfeld für Gebäudetechniker entsteht. Die Regelungssysteme müssen vorher nicht endgültig festgelegt werden, sondern sie lassen sich nachträglich besser als heute optimieren, weil die Verschaltung auf der Softwareseite erfolgt.

3.5.2 Winterfall

Von ZEIDLER (2001) wurden Untersuchungen mit Kippfenstern für verschiedene winterliche Außentemperaturen in Räumen mit mittleren thermischen Lasten durchgeführt, wie sie bei Büroräumen auftreten können. Die Messungen fanden im stationären Zustand statt. Fenster und Wärmequellen waren so eingestellt, dass die Raumtemperatur konstant blieb.

In Abb. 3.15 sind die gemessenen Geschwindigkeiten in Bodennähe über der Außentemperatur aufgetragen. Die Messungen wurden bei 22°C Lufttemperatur in 1,1 m Höhe durchgeführt. Es sind zwei schraffierte Bereiche eingezeichnet. Der obere Bereich gilt für 5° gekippte Fensterflügel. Bei nur $2,5^\circ$ gekippten Fenstern kommt ein geringerer Volumenstrom herein, das wirkt sich vergleichmäßig auf die Temperaturen aus. Für Öffnungswinkel von $2,5^\circ$ lassen sich behagliche Luftgeschwindigkeiten für Außentemperaturen bis ca. 6°C einhalten. Bei weiter geöffneten Fenstern (5° Öffnungswinkel) sollten 10°C nicht unterschritten werden. Die Luftgeschwindigkeiten würden sonst über $0,15 \text{ m/s}$ ansteigen.

³ 5° entspricht einer Kippweite von 7 cm, 3° entspricht 3 cm.

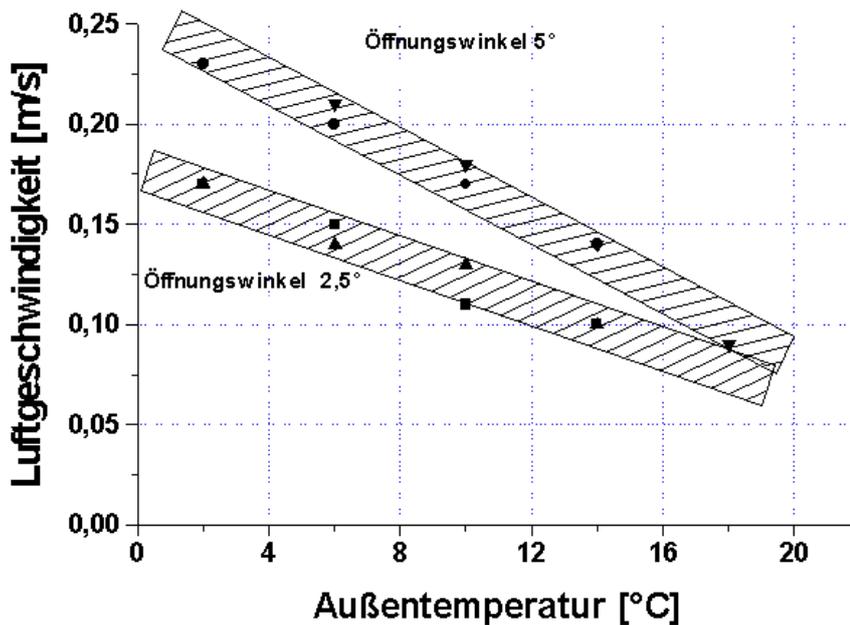


Abb. 3.15 Luftgeschwindigkeiten in 1,3 m Abstand vom Fenster (gemittelt)

Die gemessenen Temperaturen in Bodennähe erreichen erst bei geringeren Außentemperaturen kritische Werte. Die kritischere Größe sind die Luftgeschwindigkeiten, wenn die üblichen Abstände von der Fassade von etwa 1,2 m bis 1,5 m eingehalten werden sollen.

Bei einer Auftragung der Luftgeschwindigkeit über der Kühlleistungsdichte, das ist die thermische Last bezogen auf die Grundfläche, zeigt sich der in Abb. 3.16 dargestellte Verlauf. Zusätzlich ist die von BEHNE ermittelte Kurve für die erwarteten Luftgeschwindigkeiten bei Deckenkühlung eingetragen.

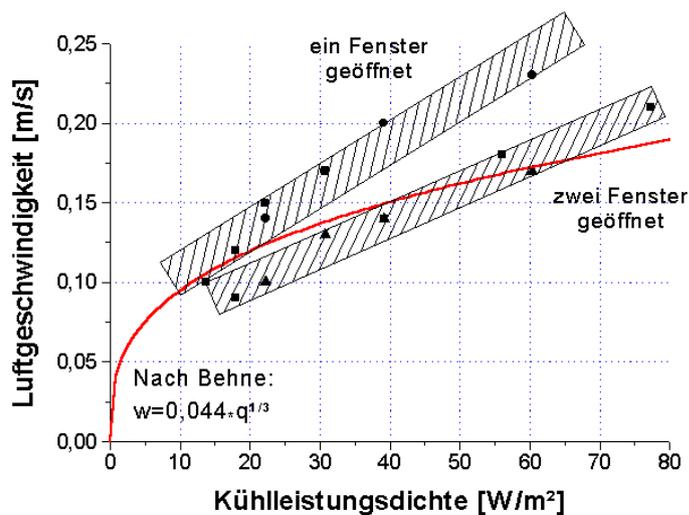


Abb. 3.16 Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Kühllastdichte

Die Fensterflügel sind 2,1 m hoch und 0,67 m breit, die Kippstellung beträgt 5° (Kippweite $s = 7$ cm). Der Raum hat eine Grundfläche von $23,6 \text{ m}^2$. Die Messwerte liegen in den beiden schraffierten Bereichen. Ist nur ein Fenster geöffnet, so sind die Luftgeschwindigkeiten höher als bei zwei geöffneten Fenstern. Ab ca. 30 W/m^2 ($600 \text{ W/Kippfenster}$) werden die zulässigen Geschwindigkeiten überschritten. Bei der Verteilung der Zuluft auf zwei geöffnete Fenster liegen die Geschwindigkeiten im Bereich der Werte, die bei Quelläftung erreicht werden. Der Grenzwert für die abgeführte Leistung liegt wiederum bei $600 \text{ W/Kippfenster}$.

Bei einem geöffneten Fenster wird die ganze Leistung durch zwei Zuluftstrahlen in den Raum gebracht. Bei zwei geöffneten Fenstern sind es vier Strahlen. So wird eine bessere Verteilung der Zuluft erreicht, die Luftgeschwindigkeiten sinken. Mit mehreren kleinen Zuluftöffnungen lassen sich leichter behagliche Zustände einstellen als mit wenigen großen. Bei sehr gleichmäßig verteilter Öffnung in der Fassade könnte eine geringfügige Steigerung der abführbaren Leistung möglich sein. Untersuchungen von WILDEBOER (2007) mit schlitzförmigen Öffnungen statt der Kippfenster ergaben, dass dadurch keine Steigerung der bezogenen Lasten möglich ist.

Bei Fensterlüftung besteht im Winter die Gefahr von Zegerscheinungen. Nur in der Übergangszeit lassen sich bei Fensterlüftung behagliche Zustände einhalten und auch die inneren Lasten abführen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anforderungen an die Behaglichkeit folgende Grenzen setzen:

- Bei geöffneten Kippfenstern liegt die Grenze der behaglich abzuführenden Kühlleistung bei ca. 600 W/Fenster .
- Die Außentemperatur sollte nicht unter 6°C bis 10°C liegen (je nach Fensteranordnung).

Es lässt sich eine Grenze der konstanten Leistung pro Zuluftöffnung/Zuluftstrahl angeben. Es sollten 250 bis $300 \text{ W/Zuluftstrahl}$ nicht überschritten werden. Für den Bau künftiger Bürogebäude und für die Sanierung bereits bestehender lässt sich erkennen, dass Fassaden mit möglichst vielen unterschiedlich großen, einstellbaren Öffnungen versehen werden sollten, damit sich der benötigte Zuluftstrom individuell an Wetterbedingungen und Lasten anpassen lässt. Die Fensterlüftung in Bürogebäuden hat damit nur einen eingeschränkten Einsatzbereich.

Wenn die zulässige konstante Kühlleistung überschritten wird, bietet sich die Stoßlüftung an, bei der die Fenster für eine Dauer von einigen Minuten geöffnet werden, in der unbehagliche Bedingungen in Kauf genommen werden.

3.6 Speicherung

Bei konstanter Leistung spielt die Speicherung der Wärme in den Wänden und dem Mobiliar keine Rolle. Nur bei Anwendung der Stoßlüftung gewinnt sie an Bedeutung. Auch bei Hitzeperioden im Sommer ist sie wichtig, wenn die Fenster nachts geöffnet werden können.

3.7 Konzentrationsverlauf

Die Konzentration im Raum als Funktion der Zeit ist allgemein:

$$c(t) = c_a + (c_o - c_a) * e^{-nt} + \frac{q}{n * V} (1 - e^{-nt}) \quad (3.15)$$

n	Luftwechsel h ⁻¹
c	Konzentration
c(t)	augenblickliche Konzentration
c _a	Konzentration der Zuluft
c _o	Anfangskonzentration
t	Zeit
V	Raumvolumen m ³

Bei konstantem Luftwechsel n und konstanter Verunreinigungsquelle q, hier der CO₂-Quelle, ergibt sich für c_a=c_o und für 2 Personen mit einer Quellstärke von je 18 l/h CO₂:

$$c(t) = c_a + \frac{0,036}{n * V} (1 - e^{-nt}) * 10^6 \text{ in ppm} \quad (3.16)$$

Der Verlauf ist in Abb. 2.2 dargestellt. Die Gleichung entspricht Gl. 2.1.

Bei der Stoßlüftung ändert sich spontan der Zuluftstrom und es liegt der instationäre Fall vor. Aus Gleichung 3.15 ergibt sich bei Vernachlässigung der dritten Terms durch Differenzieren und Logarithmieren eine Gleichung für den Luftwechsel. Der Luftwechsel ohne Quellen ergibt sich aus dem Abklingen der Konzentrationsdifferenz c_o-c_a am Anfang auf c_e-c_a nach der Zeit t:

$$n = \frac{1}{t} \ln \frac{c_o - c_a}{c_e - c_a} \quad (3.17)$$

c_e Konzentration nach der Zeit t

Bei den Versuchen zur Stoßlüftung betrug die Außenluftkonzentration 380 ppm. Für die Auswertung der Stoßversuche wird Gl. 3.18 benutzt. Die Vernachlässigung des Quellterms aus Gleichung 3.15 lässt sich korrigieren bei den Messwerten, die alle 2 Sekunden anfallen. q/(V*t) beträgt für die gegebenen Daten 36*2/(3600*1000*179) = 0,11 ppm

$$n = \frac{1}{t} * \ln \frac{c(t) - 380 - q/(V * t)}{c_o - 380} \quad (3.18)$$

4 Bautechnische Grundlagen

4.1 Fenster

In den Abb. 4.1 bis 4.6 werden die verschiedenen häufig anzutreffenden Fensterarten dargestellt (HEBGEN, PÜTTMANN 1988). Das sind:

1. Dreh- oder Drehkippflügel (Abb. 4.1)
2. Drehkippflügel mit großem Spalt (Abb. 4.2),
3. Drehkippflügel mit kleinem Spalt (Abb. 4.3),
4. Oberlichtkippflügel (Abb. 4.4),
5. Schwingflügel (Abb. 4.5) und
6. Horizontalschiebefenster (Abb. 4.6) und Vertikalschiebefenster (nicht dargestellt).

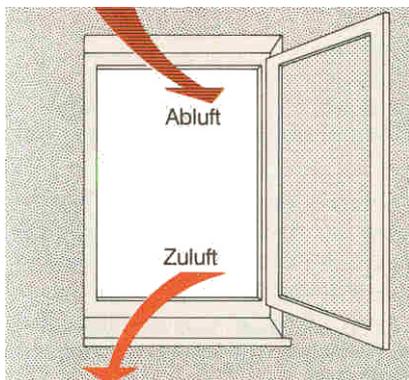


Abb. 4.1 Dreh- oder Drehkippflügel Fenster

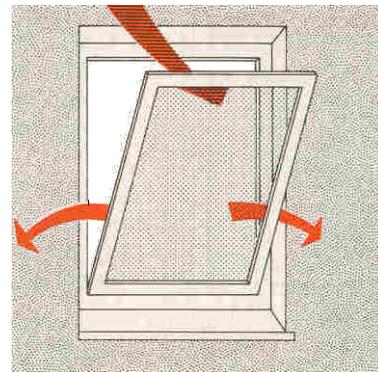


Abb. 4.2 Drehkippflügel Fenster (großer Spalt)

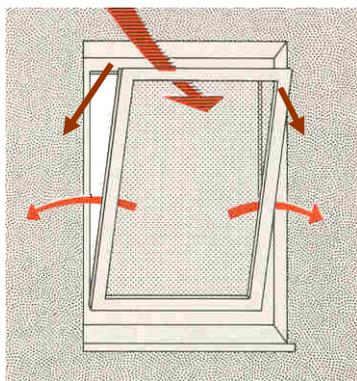


Abb. 4.3 Drehkippflügel Fenster (kleiner Spalt)

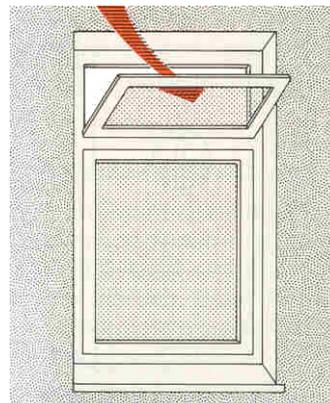


Abb. 4.4 Oberlicht-Kippflügel

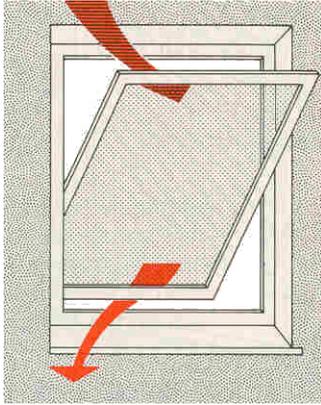


Abb. 4.5 Schwingflügelfenster

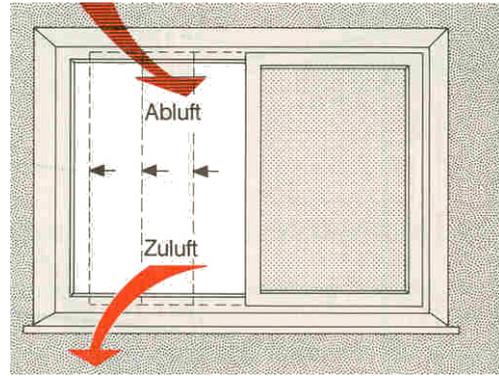


Abb. 4.6 Horizontalverschiebefenster

Die Dreh- oder Drehkippflügel-Fenster sind in Deutschland am häufigsten im Wohnungs- und Bürobau anzutreffen. Das Fenster kann wahlweise um eine vertikale Achse als Drehflügel oder um eine horizontale Achse, meist unten, als Kippfenster benutzt werden. Als Drehfenster erlaubt es eine sehr große Öffnung, die hauptsächlich als kurzfristige ganz offene Öffnung im Winter als sogenannte Stoßlüftung angewendet wird oder als Dauerlüftung im Sommer an windstillen Tagen und Temperaturen der Außenluft im Behaglichkeitsbereich (siehe Abb. 4.1). Als Raumströmungsform entsteht eine Mischluftströmung.

Das Kippfenster wird hier mit zwei üblichen Kippstellungen (Abb. 4.2 und 4.3) dargestellt. Die Kippstellung mit großem Spalt, häufig mit einem Winkel von 5° , ist in der Übergangszeit geeignet, die Kippstellung mit kleinem Spalt ist für den Winter geeignet. Experimentelle Untersuchungen an solchen Kippfenstern wurden von ZEIDLER (2001) durchgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass eine stufenlose Regelung eine bedarfsgerechte Lüftung während der Winterzeit verbessert. Dazu ist aber eine zusätzliche Einrichtung zum Einstellen in mehreren Stufen (Abb. 4.7) oder eine stufenlos einstellbare Vorrichtung erforderlich. Die häufig anzutreffende kleinste Einstellung (3°) ist an kalten Wintertagen noch zu groß. Am Ende wäre ein Stellmotor für die richtige Einstellung geeignet, wie er z. B. von WAGNER UND ROTH (2007) gezeigt wird. Beim Kippfenster hat ein Stellmotor allerdings den Nachteil, dass er ausgeklinkt werden muss, wenn das Fenster als Drehfenster benutzt werden soll, ähnlich wie das bei dem Feststellhaken auf Abb. 4.7, links dargestellt ist.

Das Oberlichtfenster (Abb. 4.4) erlaubt im Allgemeinen auch verschiedene Kippstellungen und ist wie das Kippfenster zur Belüftung in der Übergangszeit und im Winter geeignet. Es kann für das Ausströmen der Abluft dienen, wenn Zuluft aus dem Gebäude in den Raum nachströmt, oder als Zu- und Abluftöffnung, wenn aus dem Gebäude keine Luft nachströmen kann. Die Luft strömt dann im oberen Bereich als Abluft nach draußen und im unteren Bereich, im Wesentlichen in den beiden dreieckigen seitlichen Öffnungen als Zuluft nach innen. An kalten Wintertagen ist diese Fensterart besser zum Lüften geeignet, weil der Weg der Zuluft von oben nach unten länger ist, und sich die Temperatur der Luft auf dem Strömungswege durch Vermischung erhöht. Es ist am besten regulierbar, weil die Öffnung auch für kleine Volumenströme größer sein kann als beim Kippfenster. Zur Regulierung können Stellmotoren eingesetzt werden, wie sie von verschiedenen Firmen z. B. ISA (2006) angeboten werden.

Das Schwingflügel Fenster (Abb. 4.5) gestattet, leicht große Öffnungsquerschnitte für die Stoßlüftung im Winter oder Dauerlüftung im Sommer einzustellen. Die Einstellung sehr kleiner Spalte im Winter ist nur möglich, wenn eine Feststelleinrichtung vorgesehen ist. Ähnliches gilt für Horizontal- und Vertikalverschiebefenster (Abb. 4.6).

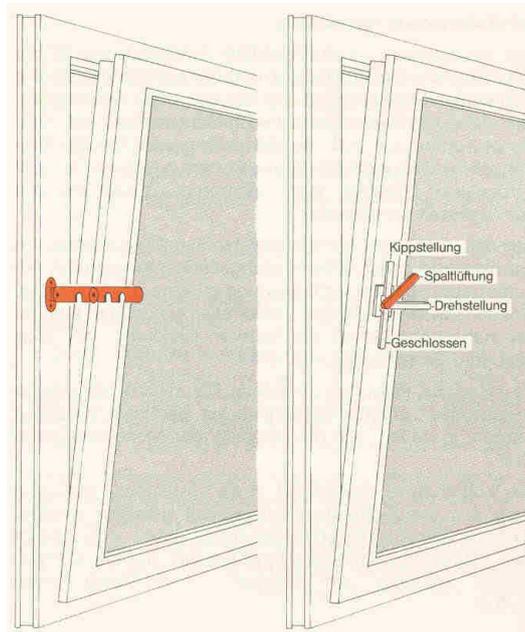


Abb. 4.7 Möglichkeiten zum Einstellen eines Fensterspalts: Feststellhaken (links) und Kippbeschlag (rechts) mit 4 Stellungen: Kipp, Spalt, Dreh, geschlossen)

Bild 4.7 rechts zeigt eine spezielle Lösung. Bei der Stellung des Griffes nach schräg oben wird eine Spaltlüftung eingestellt, die für schwache Dauerlüftung empfehlenswert ist.

Die bisher erwähnten Fenster werden in Lochfassaden oder in Elementfassaden angeordnet. Weitere Fassadenarten werden u. a. in (HAUSLADEN 2005) beschrieben. Die Abb. 4.8 bis Abb. 4.12 geben acht verschiedene Fassadenvarianten wieder.

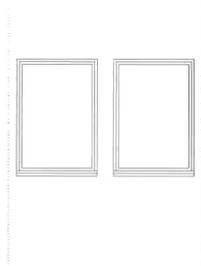


Abb. 4.8 Lochfassade

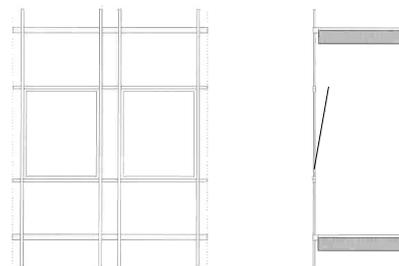


Abb. 4.9 Elementfassade

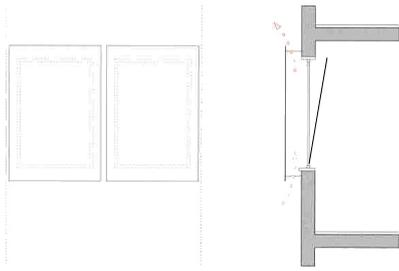


Abb. 4.10 Prallscheibe

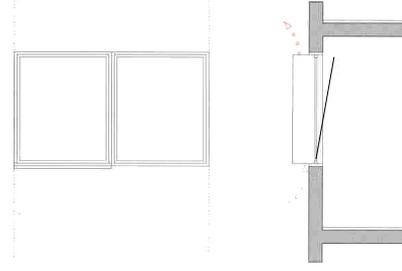


Abb. 4.11 Wechselfassade

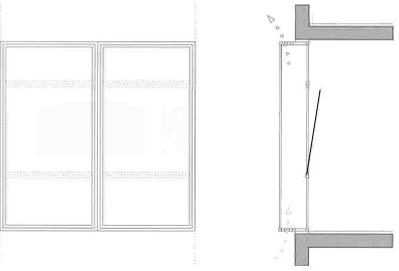


Abb. 4.12 Kastenfensterfassade

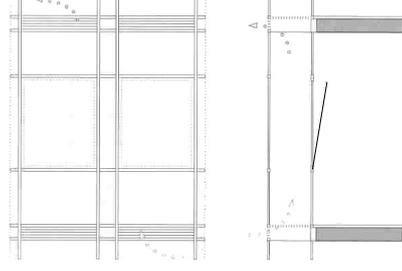


Abb. 4.13 Korridorfassade

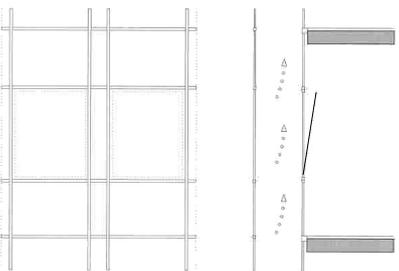


Abb. 4.14 Unsegmentierte Doppelfassade

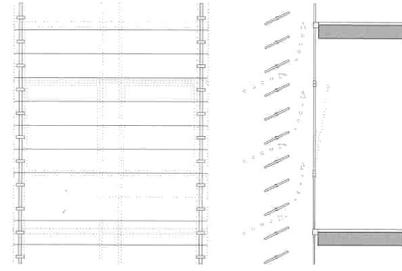


Abb. 4.15 Steuerbare Doppelfassade

Die folgenden Fassadenarten

- Prallscheibe,
- Wechselfassade,
- Kastenfensterfassade,
- Korridorfassade,
- Unsegmentierte Doppelfassade und
- steuerbare Doppelfassade

zeichnen sich dadurch aus, dass vor dem eigentlichen Fenster eine zusätzliche Scheibe angebracht wird. Sie führt bei Tageslicht je nachdem wie gut der entstehende Luftzwischenraum von Außenluft durchströmt wird, zu einer Erwärmung der Luft vor dem Fenster. Das kann im Winter vorteilhaft sein, im Sommer aber zu Behinderung der Durchlüftung und zu Überhitzung führen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird auf die Einflüsse der einzelnen Fassadenformen nicht eingegangen.

In den Abb. 4.16 bis Abb. 4.19 werden verschiedene Möglichkeiten der Anordnung von Zuluftelementen dargestellt (HEBGEN, PÜTTMANN 1988). Die Lüftungselemente sind für Dauerlüftung geeignet und können bei einigen Fabrikaten auch verschlossen werden. Es gibt zahlreiche Ausführungsformen. Sie sollten möglichst auf unterschiedliche Querschnitte einstellbar sein. Sie sind für Dauerlüftung im Winter geeignet, wenn sie genügend fein eingestellt werden können. Der größte Luftaustausch ist erreichbar, wenn ein Element unterhalb und eins oberhalb des Fensters angebracht ist (s. Tabelle 3.2).

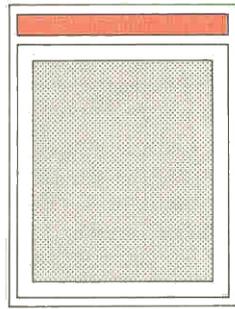


Abb. 4.16 Zuluftelement über dem Fenster

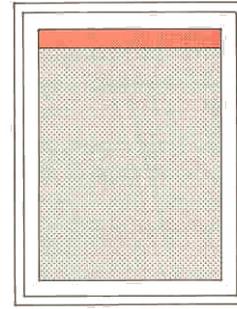


Abb. 4.17 Zuluftelement im Fenster

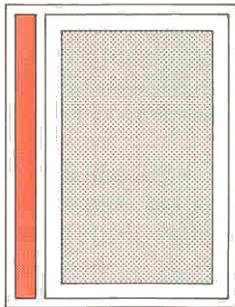


Abb. 4.18 Zuluftelement neben dem Fenster

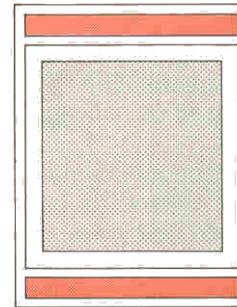


Abb. 4.19 Zuluftelemente oberhalb und unterhalb des Fensters

4.2 Außenwandluftdurchlässe (ALD)

Eine Weiterentwicklung einfacher Lüftungselemente stellen die Außenwanddurchlässe dar. Sie existieren in unterschiedlichsten Konstruktionen. Sie werden in der Außenwand oder in Fensterrahmen eingebaut. Es handelt sich um kleine Öffnungen mit Klappen, manchmal auch mit Insektenschutzgitter, Schalldämpfer und Filter. Die Klappen sind so ausgebildet, dass sie als Volumenstromregler arbeiten. Sie sollen dafür sorgen, dass bei steigendem Winddruck oder größeren Auftriebskräften der Außenluftvolumenstrom nicht permanent zunimmt. Abb. 4.20 (MARKFORT, HEINZ (2004)) zeigt eine Volumenstrom-Druck-Kennlinie eines ALD. Der Volumenstrom steigt zunächst mit der Wurzel aus dem Druck an (V_{\max} obere gestrichelte Linie), aber bei einem Volumenstrom von $32 \text{ m}^3/\text{h}$ beginnt er zu fallen, wenn der Druck weiter anwächst (V_s für Volumenstrom bei steigendem Druck). Bei einer Druckdifferenz zwischen innen und außen von etwa 100 Pa wird ein Minimum von etwa $22 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Die Kennlinie wurde bis zu einer steigenden Druckdifferenz von 200 Pa gemessen. Der Volumenstrom steigt dabei bis auf $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei abfallendem Druck

entsteht eine andere Kennlinie, die aber nicht unter 15 m³/h fällt. Da es sich bei dieser Klappe um einen Regler ohne Hilfsenergie handelt, hat der Regler eine Hysterese, die wegen der einfachen Konstruktion nicht unerheblich ist. Die Volumenströme werden bei diesem Regler im Bereich von 15 m³/h bis 35 m³/h variieren. Wie aber ein Vergleich mit der oberen punktierten Kennlinie für den unregulierten Fall zeigt, ist dieser einfache Regler bei hohen Druckdifferenzen (>20 Pa) besser geeignet als eine Öffnung ohne Regler. Die Volumenströme der verschiedenen untersuchten ALD (MARKFORT, HEINZ (2004)) liegen im Bereich von 5 m³/h bis 30 m³/h. Bei richtiger Anbringung, z. B. als Radialauslass in der Außenwand möglichst hinter einem Heizkörper sind Volumenströme bis 30 m³/h unter thermisch behaglichen Bedingungen möglich.

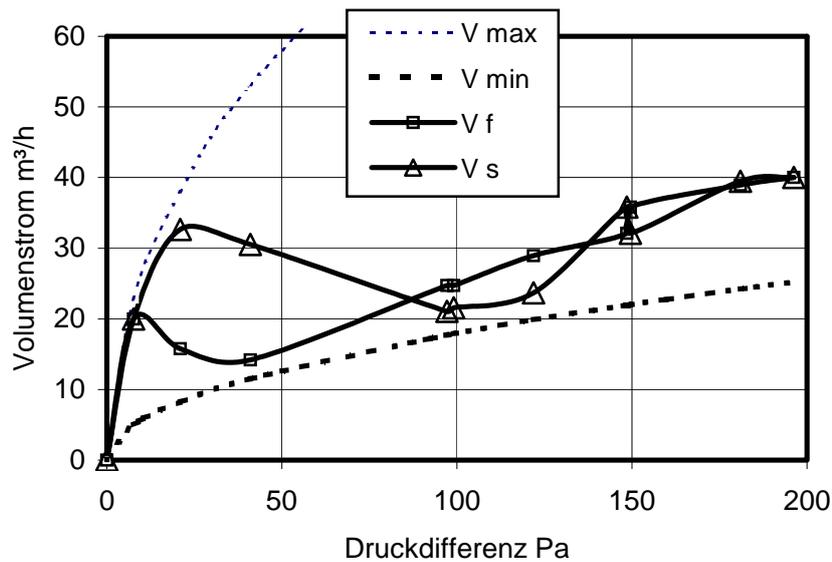


Abb. 4.20 Kennlinie eines Außenwandluftdurchlasses (ALD)

Die Kennlinie zeigt aber auch, dass dieser ALD für kleine Druckdifferenzen ungeeignet ist. Erst bei Druckdifferenzen, die größer als 20 Pa sind, beginnt der Regler zu arbeiten, darunter tritt zu wenig Luft ein. Ab 20 Pa beginnt die Regelung und der Luftvolumenstrom erreicht mehr oder weniger den angestrebten Bereich. Er ist also weniger gut für freie Lüftung in Wohngebäuden geeignet, sondern eher in Gebäuden mit Abluft- oder Zuluftventilatoren oder Schachttypgebäuden, bei denen die Mindestdruckdifferenz von 20 Pa aufgebracht wird.

Die Lufterblasrichtung in den Raum ist unterschiedlich. Bei der Untersuchung hat es sich als zweckmäßig ergeben, die Luft nicht einfach in den Aufenthaltsbereich zu blasen, sondern entweder einen wandbündigen Radialstrahl zu erzeugen oder den ALD hinter einem wandhängenden Heizkörper einblasen zu lassen. Die Einfriergefahr des Heizkörpers wird allerdings nicht erwähnt. Es wird abgeraten, die Luft oberhalb der Aufenthaltszone in den Raum einzublasen.

4.3 Klappen

Die ALD stellen bereits eine komplizierte Form von Klappen als Zu- und Abluftöffnungen dar. Es sind aber auch einfache Lüftungsklappen als Zu- und Abluftöffnungen in Gebrauch, die mit Hand betätigt werden können. Wegen der Vielfalt der Konstruktionen und andererseits ihrem seltenen Einsatz wird darauf hier nicht weiter eingegangen.

Weiterhin sind Klappen als Drossel- oder Verschlusselemente an Einströmöffnungen von Schächten und in Schächten üblich.

4.4 Schächte

Schächte werden für die Abluftabsaugung bei freier Lüftung eingesetzt, um den thermischen Auftrieb zu erhöhen. Sie werden als Abluftschacht an die zu entlüftenden Räume angeschlossen. Das ist besonders wichtig für innen liegende Räume. Die Zuluft gelangt durch Fenster oder andere Öffnungen in den Raum. Die Druckdifferenz im Schacht entsteht dadurch, dass die Temperatur der Luft im Raum und im Schacht größer ist als außen. Solange keine Luft im Schacht strömt beträgt die Druckdifferenz

$$\Delta p = g * \frac{p}{R} \left(\frac{1}{\Theta_a} - \frac{1}{\Theta_R} \right) * \Delta h = g * (\rho_a - \rho_R) * \Delta h \quad (4.1)$$

Da die Außentemperatur stark schwankt, ändert sich der abgesaugte Volumenstrom. Beim Durchströmen des Schachtes wird ein Teil des Druckes als Reibungsverlust aufgebraucht.

Die Schächte können als Einzelschächte oder als Sammelschächte ausgebildet sein (HEINZ 1992, 2000). Skizzen von Abluftschächten zeigt HEINZ. Abb. 3.7 zeigt die Abluftschächte eines vierstöckigen Mehrfamilienhauses (nach DIN 1946-6). Vom Einbau von gemeinsamen Sammelschächten für mehrere Mieteinheiten wird abgeraten, weil es unkontrollierbare Strömungszustände geben kann.

Die Schachtlüftung sollte mit Außenwandluftdurchlässen kombiniert werden. Dadurch entsteht in den Räumen eine sogenannte Querlüftung. HEINZ weist auch darauf hin, dass eine optimale freie Lüftung weder mit Quer- noch mit kombinierter Schacht-/Querlüftung möglich ist.

5 Untersuchungen

5.1 Versuchsaufbau

5.1.1 Raumdaten

Die Messungen wurden im Februar 2007 im Büroraum von Klimakonzept ausgeführt. Der Grundriss wird auf Abb. 5.2 wiedergegeben. Die Grundfläche beträgt 80 m², das Volumen ohne Möbel beträgt 193 m³ und 180 m³ nach Abzug der Schränke und sonstigen Einbauten. Diese Werte wurden für die Versuchsauswertungen angesetzt.

Der Raum hat 6 dreiflügelige Fenster, von denen je zwei gekippt werden können. Sie sind von außen auf den Abb. 5.1, 5.3 und 5.4 zu sehen. Abb. 5.1 zeigt die Fenster nach Osten, Abb. 5.3 und 5.4 die Fenster nach Süden.

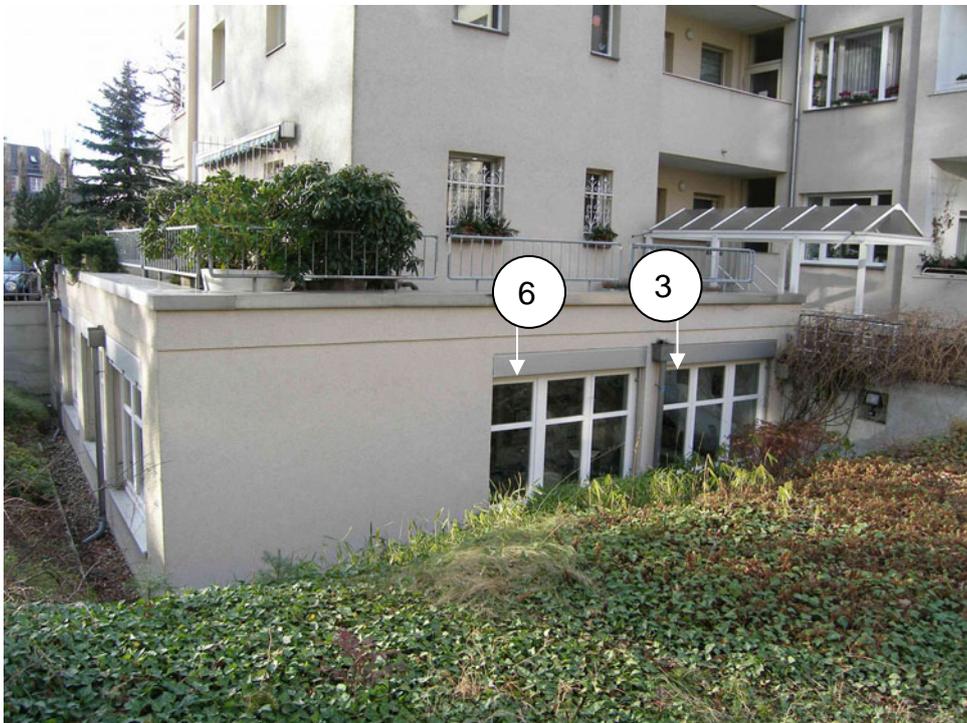


Abb. 5.1 Ostseite des Büros von außen gesehen, mit den Fensterflügeln 1 bis 6 von rechts gezählt

Es wurden nur 6 Fenster in Kippstellung gebracht. Die Mittelflügel lassen sich nicht kippen und die anderen Flügel waren nicht leicht erreichbar und wären in einem normalen Büro deshalb nicht geöffnet worden. Da die Versuchsanordnung möglichst praxisnah sein sollte, wurden nur 6 Flügel gekippt.

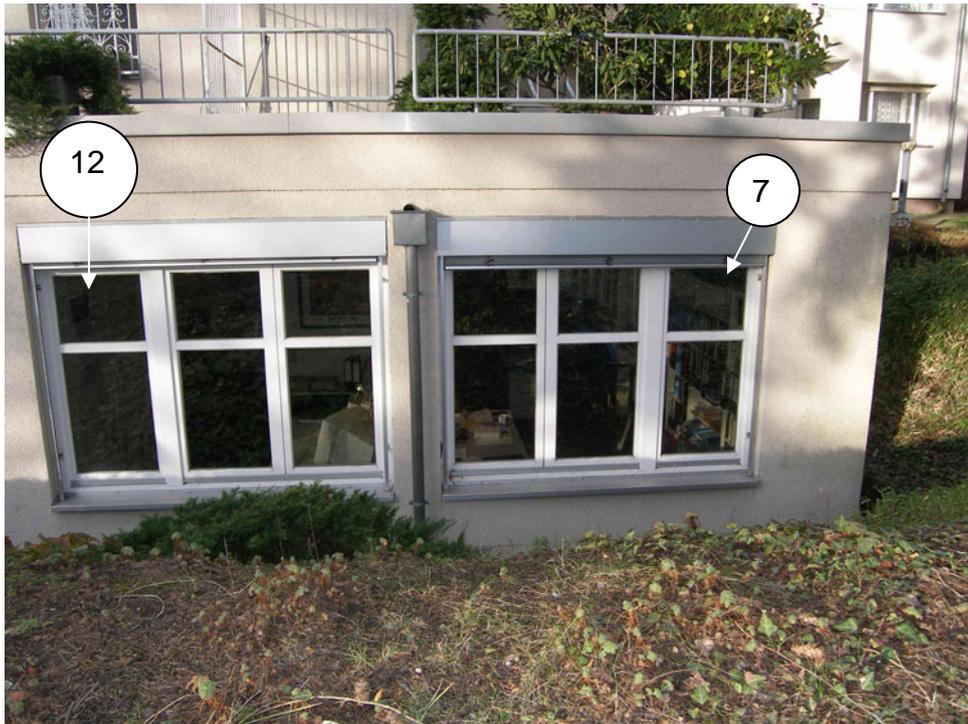


Abb. 5.3 Fenster nach Süden, östlich, Fensterflügel 7 bis 12 von rechts gezählt



Abb. 5.4 Fenster nach Süden, westlich, Fensterflügel 13 bis 18 von rechts gezählt

Auf den Abbildungen ist auch die Einbausituation zu erkennen. Je nach Windrichtung kann beim Fensterflügel 1 und 18 ein Stau entstehen. Ebenso lassen sich mögliche schwache Staueffekte an den äußeren Fensterlaibungen erkennen.



Abb. 5.5 Ansicht der Fensterflügel von innen, von links nach rechts: 5 halb, 6 bis 10 vollständig, 11 halb sichtbar

Abb. 5.5 zeigt die Ansicht einiger Fenster von innen. Die Fensterflügel haben folgende äußere Rahmenabmessungen auf der Raumseite: Breite 0,71 m und Höhe 1,48 m. Fensterrahmen und Fensterflügel sind aus Holz gefertigt.

Die Höhe der neutralen Zone wird als Höhe über der Unterkante des Rahmens angegeben. Die Unterkante liegt in einer Höhe von 0,89 m über dem Fußboden. Als neutrale Zone wird die Stelle bezeichnet, wo keine Luft ein- oder austritt. Das lässt sich mit einem Raucherhalm lokalisieren. Allerdings ist ihre Höhe nicht konstant. Sie ändert sich bei Druckänderungen durch Wind.

Zur Charakterisierung der Kippstellung wird an der Oberseite ein Rahmenabstand gemessen. Es ist der Abstand, „Kippstellung“, der oberen raumseitigen Vorderkante des Kippflügels bis zur Vorderkante des Fensterrahmens. Die Öffnung (Kippweite) ist ungefähr um die Rahmenstärke (69 mm) kleiner. Die genaue Kippweite wird aus der Geometrie des gestuften Fensterrahmen ermittelt (Abb. 5.10; Foto Abb. 5.6 und Maße Abb. 5.7).



Abb. 5.6 Seitenansicht eines gekippten Flügels, Kippstellung $k = 13$ cm, Kippweite $s = 6,5$ cm

Abb. 5.6 zeigt eine Seitenansicht der oberen Hälfte eines gekippten Flügels und die Messung an der Oberkante mit einem Zollstock (hier Rahmenabstand 13 cm). Bei den engeren Spalten wurde das Maß mit einer Schieblehre gemessen.

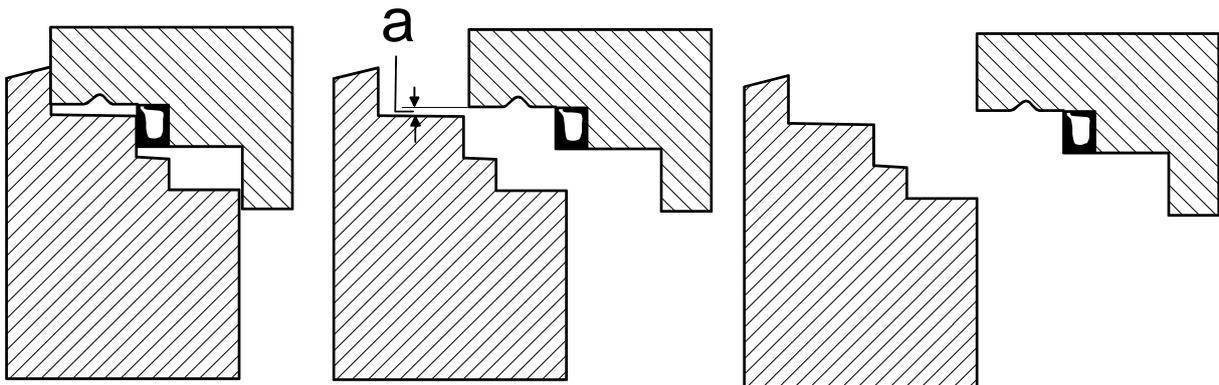


Abb. 5.7 Seitliche Rahmenprofile des Fensters in 3 Kippstellungen

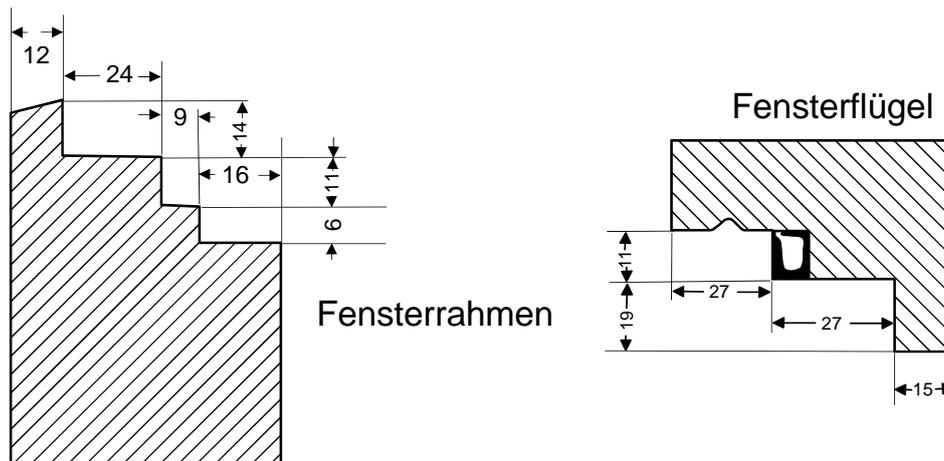


Abb. 5.8 Maße des Fensterrahmenprofils

Abb. 5.7 zeigt Querschnitte von Fensterrahmen und Fensterflügel in drei verschiedenen Stellungen. Die seitlichen Profile bewegen sich beim Öffnen in einer Ebene, die oberen Rahmen auf einer Zylinderfläche. Die Profilabmessungen selbst sind bis auf den unteren Fensterrahmen gleich.

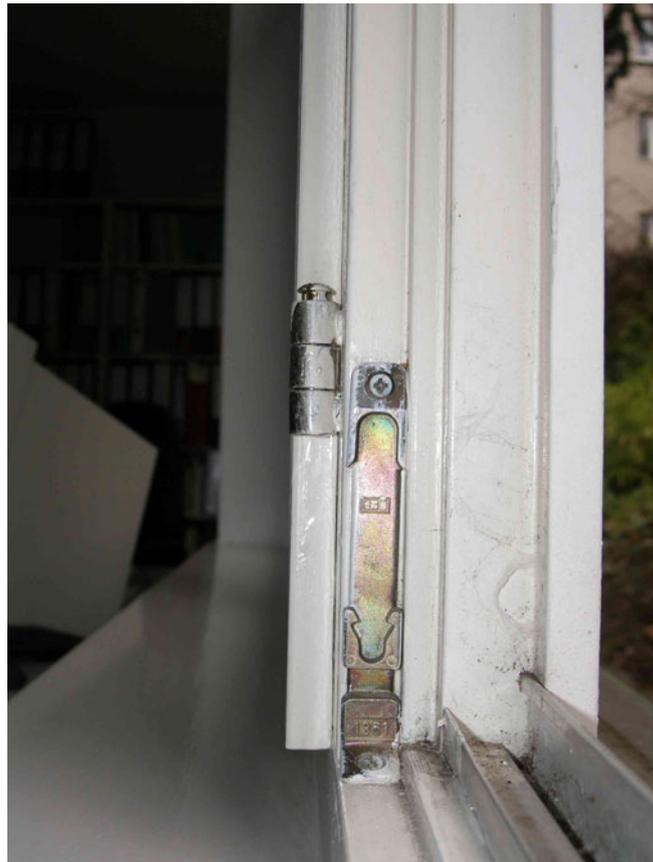


Abb. 5.9 Das untere Fensterrahmenprofil

Die für die Versuchsdurchführung praktische Messung der Kippstellung k kann umgerechnet werden in die Kippweite s als kleinste lichte Entfernung zwischen den

Rahmen an der Oberseite (siehe Abb. 3.12). Zum Vergleich mit Messergebnissen anderer Autoren mit anderen Rahmenabmessungen (siehe Abb. 5.10) ist die Kippweite s besser geeignet.

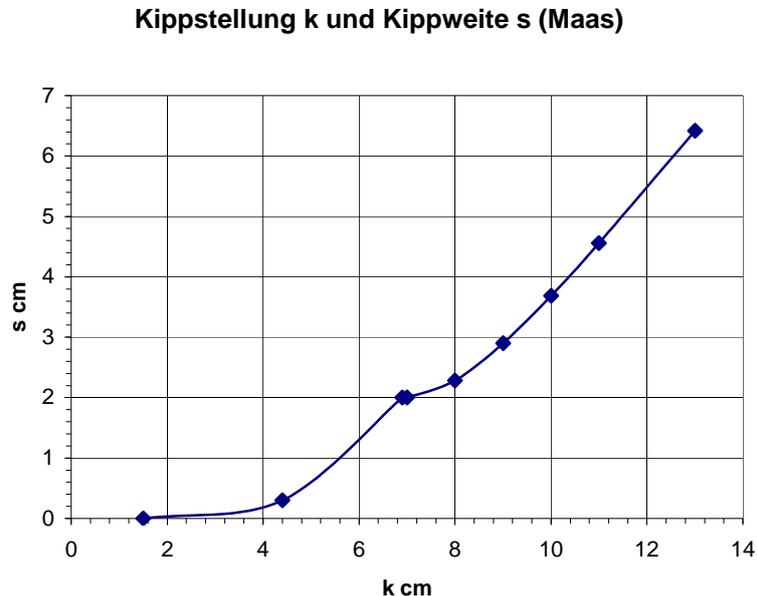


Abb. 5.10 Kippweite s und Kippstellung k

Der untere Fensterrahmen hat ein anderes Profil, wie Abb. 5.9 zeigt. Die untere Profilform spielt bei der gekippten Fensterstellung keine große Rolle, weil das Fenster hier praktisch geschlossen ist.

Die Fensterlaibung ist innen 0,145 m tief, der Abstand zwischen Rahmen und Laibung beträgt an einer Seite 0,04 m, oben ebenfalls 0,04 m.

Der Raum enthält unter jedem Fenster einen Flachheizkörper mit einem Thermostatventil MNG, Vorderseite glatt, Rückseite mit Konvektionsblech. Breite 1,0 m; Höhe 0,60 m, Tiefe 0,06 m, Vorderkante Heizkörper 0,115 m vor der Wand, Oberkante Heizkörper 0,10 m unter Oberkante der Fensterbank, der Abstand Fensterbank bis zur Unterkante Fensterflügel beträgt 0,04 m.

Ein weiterer kleinerer Heizkörper (0,6 m * 0,6 m) befindet sich unter einem kleineren Fenster (0,60 m * 0,80 m) in der Westwand. Seine Leistung wurde nicht mitgemessen, das Fenster war geschlossen und wurde nicht betätigt.

5.1.2 Messgeräte

Die **Temperaturen** wurden mit Thermoelementen Nickel/Chromnickel ermittelt. Die Lufttemperaturen wurden an einem Stativ vor dem Fensterflügel 14 (siehe auch Abb. 5.11) gemessen. Hierher strömt die Luft vom gekippten Fensterflügel 15. Die Thermoelemente sind in den Höhen von 0,1 m; 0,6 m; 1,1 m; 1,7 m montiert. Die Grundstellung ist 1,2 m von der Fassade entfernt. Weiterhin wird die Temperatur der ausströmenden Luft an der Oberkante der Fensterflügel 3 und 15 und die Außentemperatur zwischen Fensterflügel 4 und 5 (Ostseite) und zwischen 16 und 17 (Süd-

seite) gemessen. Zeitweise wurden die Temperaturen zusammen mit der Luftgeschwindigkeit in 0,1 m Höhe über dem Abstand von der Außenwand vor Fensterflügel 14 gemessen. Zur Ermittlung der Leistung der Heizkörper wurde zeitweise die Vor- und Rücklauftemperatur für die 6 Heizkörper am gemeinsamen Vor- und Rücklauf an der Rohraußenwand ermittelt. Bei der Stoßlüftung wurden zwei Wandtemperaturen gemessen, an der Pfeilerinnenseite vor Fenster 14 in 0,2 m Höhe und an der Schrankwand vor Fenster 13 in 0,6 m Höhe und 1,0 m Abstand von der Außenwand. Die Daten wurden mit einem Datenlogger Agilent 34970A minütlich aufgezeichnet.



Abb. 5.11 Blick in den Raum vor den Fensterflügeln 13 bis 16 (17)

Die **CO₂-Konzentrationen** werden mit einem Messgerät Testo 400 mit CO₂-Fühler und Behaglichkeitssonde (Temperatur; Luftgeschwindigkeit) gemessen und alle 2 Sekunden registriert.

Der **Durchfluss** der Heizkörper wird stichprobenartig mit einem Ultraschall-Durchflussmesser Fluxus ADM 6725 der Firma Flexim ermittelt. Mit dem Durchfluss und der Temperaturdifferenz wird die Heizleistung ermittelt.

Um die Leistung der Teelichter zu bestimmen, werden sie vor und nach dem Versuch mit einer Waage, Maul tronic S gewogen. Die Waage hat eine Auflösung von 0,2 g.

5.1.3 Innere Lasten

CO₂-Lasten

Es wird von einer Raumbelastung mit 8 Personen ausgegangen, 10 m² je Person. Zwei Personen halten sich während der Messung im Raum auf mit einer sensiblen Last von zusammen 160 W. Ihre CO₂-Produktion ergibt aus der Messung (s. Abb. 2.2) im verschlossenen Raum zu 18 l/h/Person. Die fehlenden 6 Personen werden im Versuch durch 18 Teelichter ersetzt. Bei einem Heizwert von 47 MJ/kg für Paraffin hat ein Teelicht eine sensible Leistung von 36,7 W und eine CO₂-Produktion von 4,5 l/h, wie es sich aus der Gewichtsänderung der Teelichter ergibt. Eine Person wird durch 3 Teelichter simuliert, was einer sensiblen Leistung von 110 W entspricht. Es ergibt sich eine sensible Gesamtleistung für die Personen und die Personensimulation von 816 W bei einer Gesamt-CO₂-Produktion von 118 l/h.

Sensible thermische Lasten

Die Feuchtigkeit im Raum wurde nicht für Versuchszwecke gemessen oder ausgewertet. Deshalb ist nur die sensible Last von Bedeutung.

Tab. 5.1 Sensible Leistung der inneren Wärmequellen

Quelle	Erklärung	Leistung W
Personen		816 W
Elektrische Geräte		
4 Rechner	Standby	250 W
2 Drucker		34 W
Kaffeemaschine		80 W
Kopierer		20 W
Beleuchtung	10 * 20W*0,5	100 W
	2*16W	32 W
	10*36W	360 W
Glühlampen	13*100W	1.300 W
Summe		2.992 W

Zusätzlich liegt die instationäre Heizung der Heizkörper bei im Mittel ca. 1.000 W. Man kann annehmen, dass sie und die äußeren Lasten ungefähr den Verlust durch Transmission decken.

Für die Versuchsauswertung wird nicht die eingebrachte thermische Last ermittelt, sondern die am Fenster gemessene Leistung der aus dem Raum strömenden Luft. Sie gleicht der Kühlleistung der einströmenden Luft. Dazu wird der ausgetauschte Volumenstrom aus der CO₂-Produktion und der Differenz der CO₂-Konzentration zwischen innen und außen ermittelt. Die Kühlleistung dieser Luft ergibt sich aus dem Massenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen der ausströmenden Luft und der Luft außen.

5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die in Tabelle 5.2 beschriebenen Messreihen wurden durchgeführt.

Tab. 5.2 Übersicht über die durchgeführten Messreihen

Nr.	Datum	Zeit	Bemerkung	Ziel	Ergebnis
1	15.02.07	11:35 - 13:35	Abgedichteter Raum	CO ₂ -Produktion von 25 TI + 2 Personen	Abb. 5.13
2	15.02.07	13:35 - 15:10	dto; 2 Personen	CO ₂ -Produktion von 2 Personen	Abb. 5.14
3	15.02.07	15:10 - 15:43	geschlossener Raum ohne Abdichtung	Infiltration	Abb. 5.15
4	19.02.07	12:50 - 15:00	Hohe Last	Grenze der Behaglichkeit	Abb. 5.17 - Abb. 5.26
5	20.02.07	11:00 - 13:20	Geringe Last	Behaglichkeit	Abb. 5.28 - Abb. 5.30
6	21.02.07	11:10 - 13:30	Stoßlüftung	CO ₂ -Abnahme, Leistung	Abb. 5.31 - Abb. 5.40
7	21.02.07	15:30 - 17:30	Stoßlüftung	Wiederholung von 6	Abb. 5.41 - Abb. 5.49

Die Versuche werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

5.2.1 Kalibrierung des dichten Raumes

Um die CO₂-Abgabe der Kerzen und der Personen und das Raumvolumen zu bestätigen wurde ein Versuch mit dem dichten Raum durchgeführt. Dazu wurden alle Fenster und Türen mit Folien abgeklebt. Die abgeklebten Bereiche blähten sich leicht nach innen zum Raum hin auf, wie Abb. 5.12 zeigt.



Abb. 5.12 Versuch im dichten Raum (Folie vor dem Fenster)

Das lässt darauf schließen, dass eine Verbindung nach außen auf dem Luftwege bestand. Vermutlich über Steckdosen oder über einen Teil der Decke, die als abgehängte Decke ausgeführt ist. Das Aufblähen ist aber gleichzeitig ein Beweis, dass die abgeklebten Zonen dicht waren und keine Außenluft in den Raum eintrat. Durch das Aufblähen verkleinert sich das Raumvolumen für diesen Versuch um 8 m^3 . Auf Abb. 5.12 sind auch zwei Teelichter zu erkennen.

5.2.2 CO₂-Anstieg durch die Teelichter und die Personen

Abb. 5.13 zeigt den gemessenen CO₂-Anstieg über der Zeit bei der CO₂-Produktion durch 25 Kerzen und 2 Personen. Bei diesem ersten Versuch wurden 25 Teelichter verwendet. Bei den späteren Versuchen wurden nur 18 Kerzen verwendet, nachdem die CO₂-Abgabe durch die Versuche ermittelt worden war. Es ergibt sich, wie erwartet, ein linearer Anstieg, ähnlich wie auf Abb. 2.2 dargestellt. Abb. 5.14 zeigt den entsprechenden Verlauf, wenn das CO₂ nur durch die 2 Personen im Raum erzeugt wird.

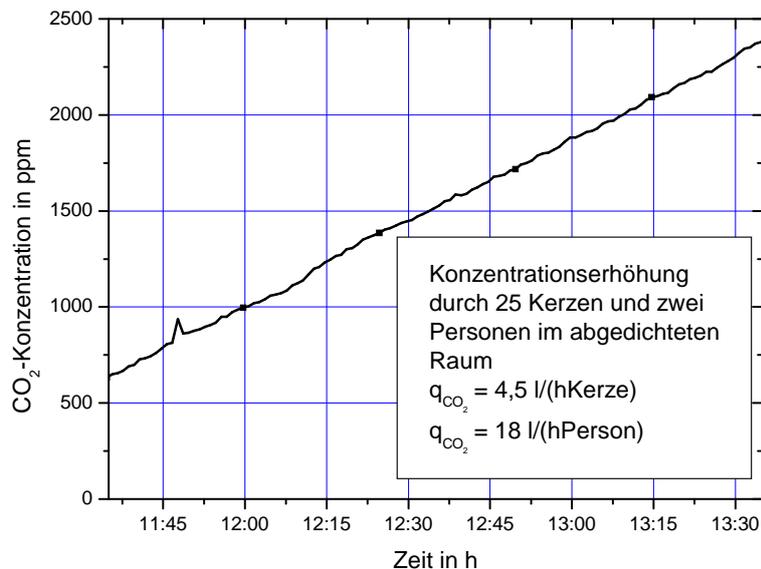


Abb. 5.13 CO₂-Anstieg bei der CO₂-Produktion durch 25 Kerzen und 2 Personen

Aus Abb. 5.14 ergibt sich mit Gl. 2.1 und 2.2, dass die beiden Personen je 18 l/h CO₂ erzeugen. Aus Abb. 5.13 lässt sich nach Abzug der CO₂-Produktion der Personen eine CO₂-Produktion von $4,5 \text{ l/h/Teelicht}$ ermittelt.

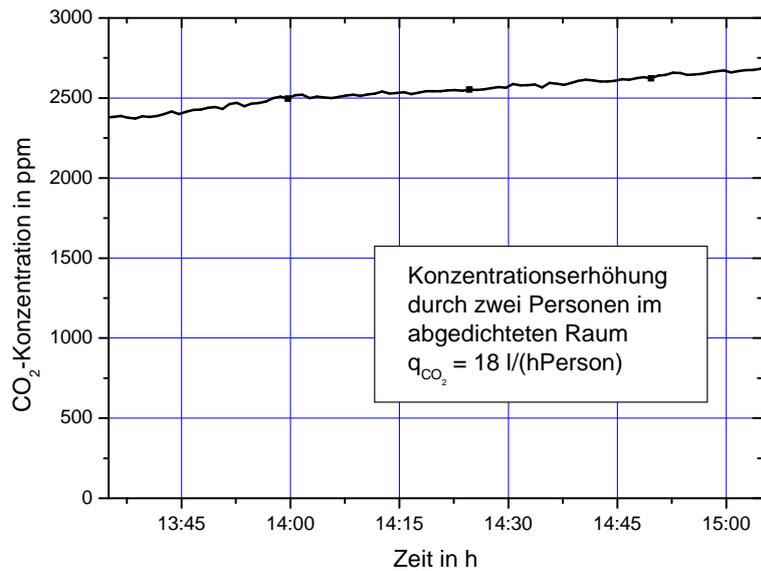


Abb. 5.14 Anstieg der CO₂-Konzentration über der Zeit durch zwei Personen

5.2.3 Infiltration bei geschlossenen Fenstern

Abb. 5.15 gibt den CO₂-Verlauf wieder ohne CO₂-Quellen im Raum. Daraus lässt sich ebenfalls mit Gl. 2.1 und 2.2 die Infiltration von Außenluft in den Raum ermitteln. Bei dieser Messung waren die Fenster nicht mehr mit Folien abgeschlossen, aber die Fenster und Türen waren geschlossen. Es ergibt sich ein Luftwechsel von $n=0,06 \text{ h}^{-1}$.

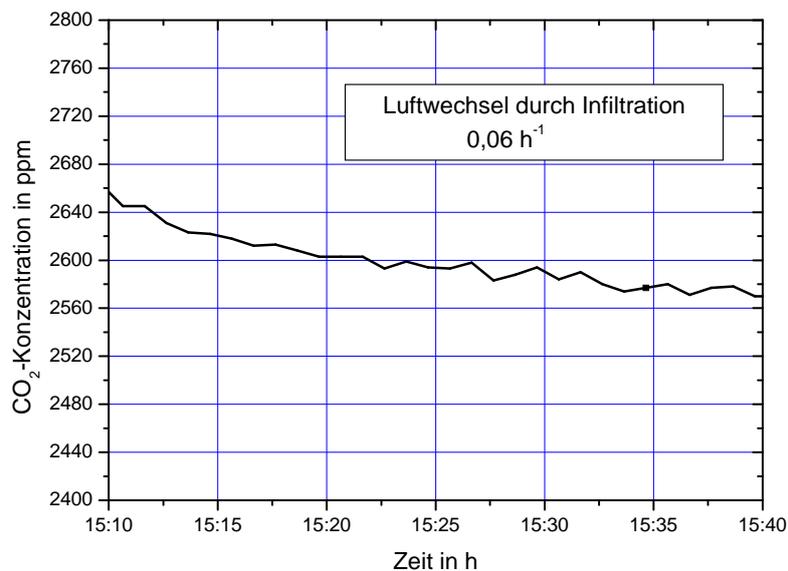


Abb. 5.15 Infiltration; CO₂-Verlauf ohne CO₂-Quellen, bei geschlossenen Fenstern

5.2.4 Hohe thermische Last

Dieser Versuch sollte zeigen, ob bei hoher thermischer Last mit Zugserscheinungen oder Untertemperatur im Raum zu rechnen ist. Als Ziel sollte die einströmende Luft eine Kühlleistung von 30 W/m^2 , also 2.400 W für den ganzen Raum, einbringen. Außerdem sollte geprüft werden, ob die Literaturangaben über den Volumenstrom abhängig von der Kippweite (Abb. 3.10) als verlässliche Angaben zu verwenden sind.

Bei 6 Fenstern in Kippstellung stellte sich bei der gegebenen Außentemperatur von ca. 7°C bei einer Kippstellung von 13 cm Beharrung der CO_2 -Konzentration ein. Die CO_2 -Konzentration der Außenluft betrug bei Versuchsbeginn 420 ppm . Abb. 5.16 gibt den CO_2 -Verlauf im Raum wieder. Aus dem CO_2 -Verlauf (Abb. 5.16) wird mit Gl. 2.1 und 2.2 der Volumenstrom ermittelt (Abb. 5.20), der in den Raum eintritt. Die Kühlleistung dieses Volumenstroms betrug schließlich 2700 W (Abb. 5.19). Abb. 5.17 stellt die am Stativ in $1,2 \text{ m}$ Abstand von der Außenwand gemessenen Temperaturen im Raum dar. (Die Symbole stellen keine Messpunkte dar, sondern markieren die einzelnen Kurven.) Der untere Messfühler zeigt verhältnismäßig starke Schwankungen an, die vermutlich durch den böigen Wind außen verursacht wurden. Um $13:32$ wurde der Heizkörper 5 abgeschaltet und er begann auszukühlen. Bis zu diesem Zeitpunkt erfüllt die Temperatur aller Messstellen die Behaglichkeitsbedingungen gerade noch.

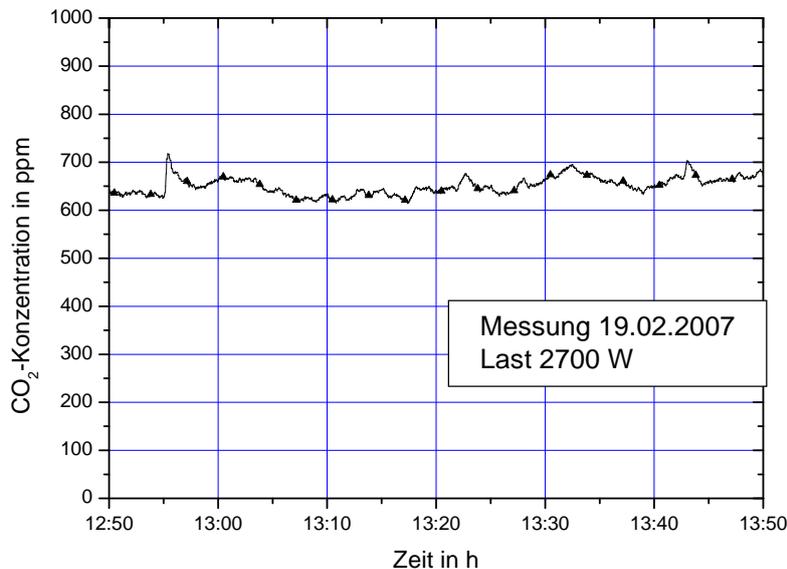


Abb. 5.16 CO_2 -Verlauf bei einer Kühlleistung der Außenluft von 2700 W

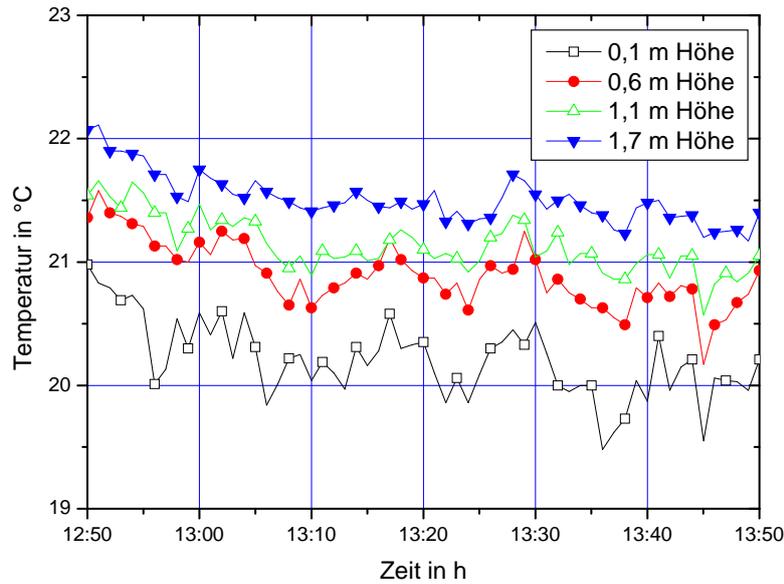


Abb. 5.17 Temperaturverlauf am Stativ bei eingeschalteten Heizkörpern

Abb. 5.18 zeigt den zeitlichen Verlauf der Außentemperaturen an der Ost- und Südfassade und die Temperatur der Fortluft, ebenfalls an der Ost- und Südfassade. Die Temperaturdifferenz an der Ostfassade ist ungefähr 1 K größer. Für die Berechnung der Leistung wurde der Mittelwert aus den Differenzen verwendet, weil nicht genau ermittelt werden kann, wie viel Luft an der Ost- und der Südfassade ausgetauscht wurde. An der Ostfassade waren nur zwei Fensterflügel, an der Südfassade vier Fensterflügel geöffnet. Durch den Wind war der Zuluftstrom an der Ostfassade kleiner, so dass sich der Unterschied teilweise aufhebt. Es wurde versucht, die Verteilung des Luftstroms auf die Fenster durch Ermitteln der neutralen Zone an den einzelnen Fensterflügeln zu bestimmen. Tabelle 5.3 zeigt die Höhe der neutralen Zone über der Unterkante des Fensterflügels zu zwei verschiedenen Zeiten. Man erkennt, dass auf der Südseite mehr Luft einströmt, um 14:50 h noch mehr als um 14:10 h. Das lässt sich mit zunehmendem Südwestwind erklären. Er erklärt auch den Stau an den Fensterlaibungen an der Südfassade, vor allem bei Fenster 7.

Tab. 5.3 Höhe der neutralen Zone (NZ) beim Versuch mit hoher thermischer Last. Kippstellung 13 cm

	Zeit	14:10 Uhr	14:50 Uhr
Fenster		Höhe der NZ über der Flügelunterkante in m	
3 Ost		0,8	0,6
6 Ost		0,7 ± 0,2	0,95
7 Süd		1,45	1,10 rechts; 1,40 links
12 Süd		1,25 ± 0,1	1,20 rechts; 1,40 links
13 Süd		0,75	1,485 Oberkante Fenster
18 Süd		0,95	0,95 rechts; 1,10 links
Mittelwert		0,98	1,14

Der Volumenstrom ist an jedem Fensterflügel etwas anders. Auf der Südseite ist der eintretende Volumenstrom am größten. Der mittlere Volumenstrom beträgt insgesamt $585 \text{ m}^3/\text{h}$, also $97,5 \text{ m}^3/\text{h}$ je Fensterflügel bei einer mittleren Temperaturdifferenz von $13,8 \text{ K}$ und der Wurzel daraus $3,7 \text{ K}^{0,5}$. Die Kippstellung hier von 13 cm entspricht einer Kippweite etwa $6,5 \text{ cm}$. Die Übereinstimmung mit der Aussage von Abb. 3.10 (Maas) ist in der Größenordnung brauchbar. Abb. 3.10 ergibt einen Volumenstrom von ungefähr $50 \text{ m}^3/\text{h}$ für ein Fenster, ist also etwa knapp 33% kleiner. Der größere Wert ist vermutlich durch den Einfluss des Windes bei unseren Versuchen zu erklären. Abb. 3.9 kann das erklären.

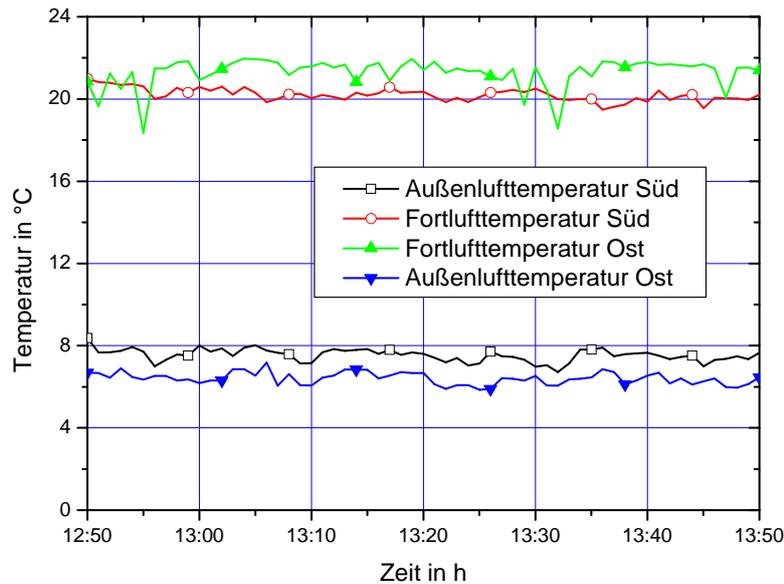


Abb. 5.18 Fortluft- und Außentemperaturen an der Süd- und Ostfassade

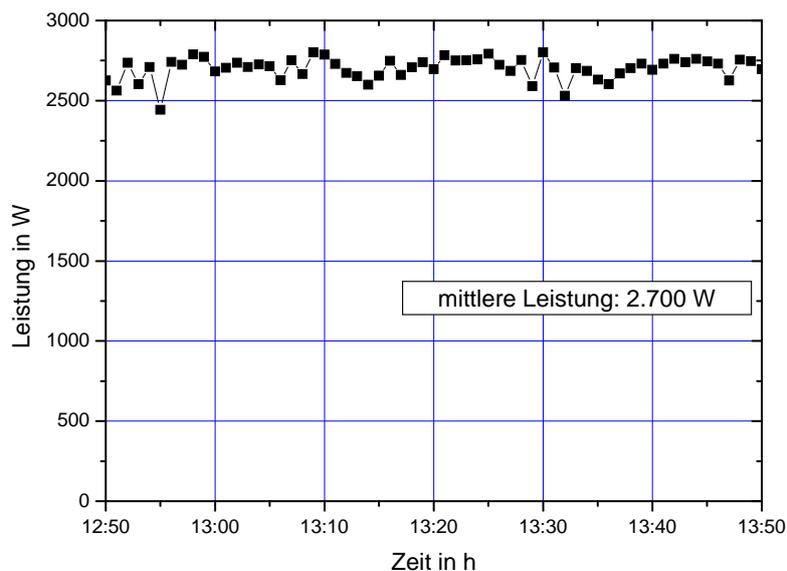


Abb. 5.19 Kühlleistung

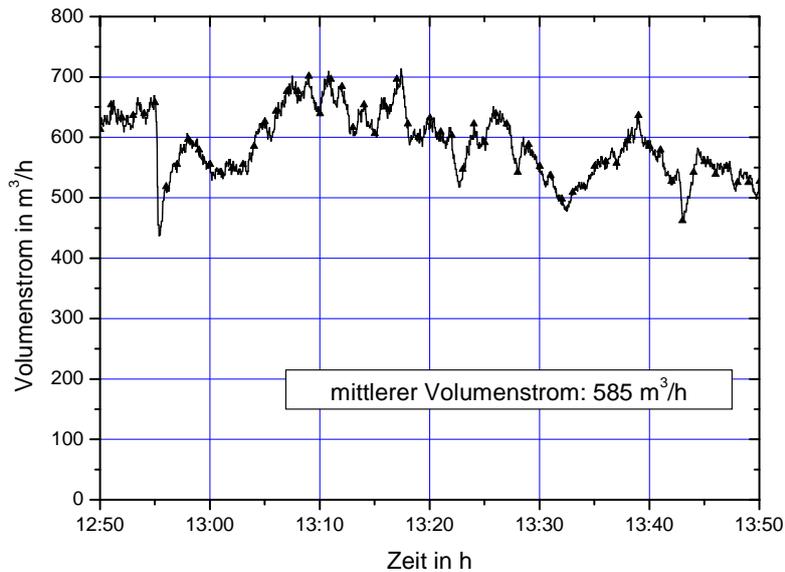


Abb. 5.20 Volumenstrom

Die Kühlleistung der einströmenden Luft (Abb. 5.19) deckte hauptsächlich die inneren Lasten ab und betrug 2.700 W. Der Verlauf ist viel gleichmäßiger als der des Volumenstromes. Die Heizkörper im Raum waren weiterhin eingeschaltet, um vor allem die Transmissionslast zu decken. Die Heizleistung schwankte im Mittel um 1.000 W, Spitzenwerte erreichten 3.800 W. Die Heizleistung von ca. 170 W je Heizkörper reichte aus, um zu verhindern, dass die herabfallende kalte Luft am Boden Zugerscheinungen hervorrief.

Abb. 5.20 gibt den Verlauf des Volumenstroms während der Messzeit wieder. Der Mittelwert beträgt $585 \text{ m}^3/\text{h} \pm 10 \%$. Das entspricht einem 3,3 fachen Luftwechsel je Stunde.

Abb. 5.21 skizziert das Strömungsbild bei eingeschalteter Heizung. Das änderte sich, wenn der Heizkörper vor den Fensterflügeln 13 bis 15 abgestellt wurde. 50 Minuten nach Abschalten der Heizung stellt sich das auf Abb. 5.22 gezeigte Strömungsbild ein. Die eintretende Luft erreicht den Boden und strömt zum Rauminneren. Die Luftgeschwindigkeiten in 0,1 m Höhe sind über dem Abstand von der Außenwand in Abb. 5.23 aufgetragen. Sie sind so hoch, dass keine Behaglichkeit mehr gegeben ist. Durch die Fensterbank und den unbeheizten Heizkörper wird die Luft zwar immer noch zum Raum hin abgelenkt, fällt aber in einer relativ breiten Zone nach unten. Das ist anders als in der Literatur angegeben für Versuche, bei denen die Außenwand glatt war (Zeidler, Wildeboer) und keinen Heizkörper aufzuweisen hatte. Die Geschwindigkeit ist ungefähr 10 % höher als sie nach Literaturdaten (Wildeboer 2007, Bild 38) zu erwarten ist.

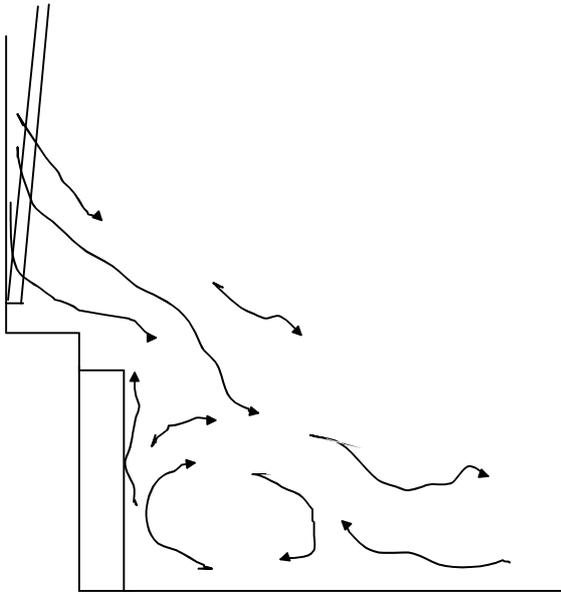


Abb. 5.21 Qualitatives Bild der Strömung vor eingeschaltetem Heizkörper

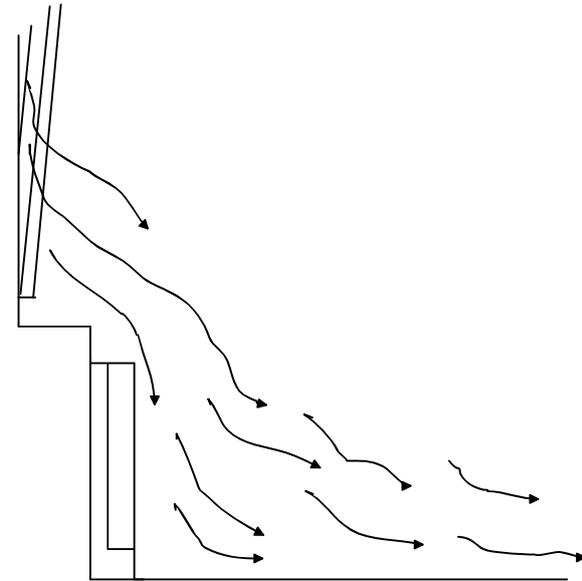


Abb. 5.22 Strömungsbild vor ausgeschaltetem Heizkörper

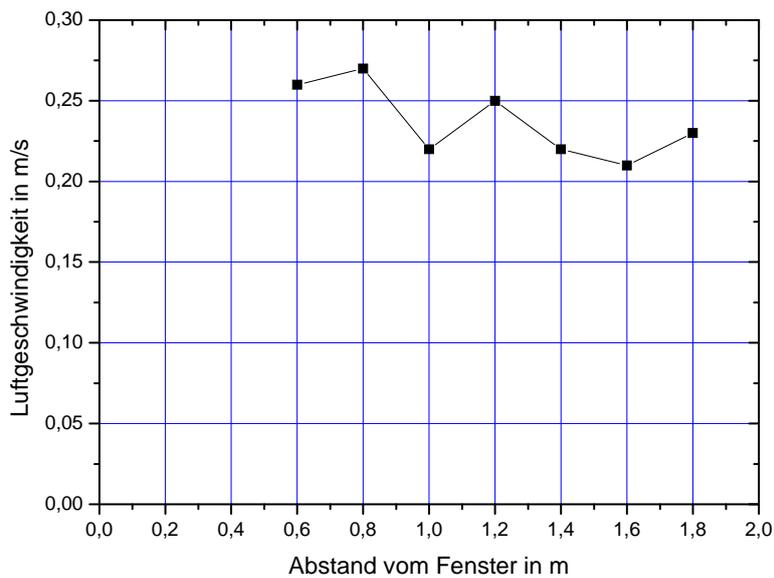


Abb. 5.23 Geschwindigkeit vor ausgeschaltetem Heizkörper am Stativ 0,1 m hoch

Abb. 5.24 zeigt den entsprechenden Verlauf des Zugluftrisikos nach Gl. 2.2. Sie bestätigt auch, dass die Geschwindigkeiten zu groß sind.

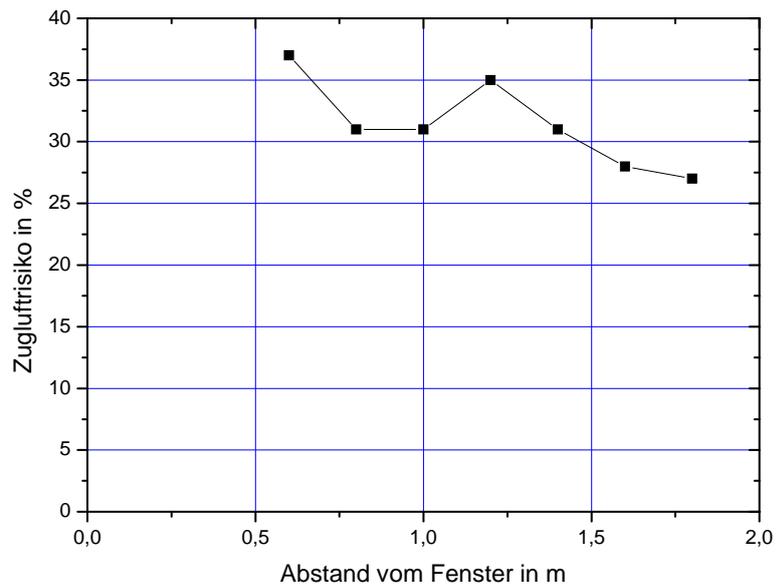


Abb. 5.24 Zugluftisiko vor ausgeschaltetem Heizkörper

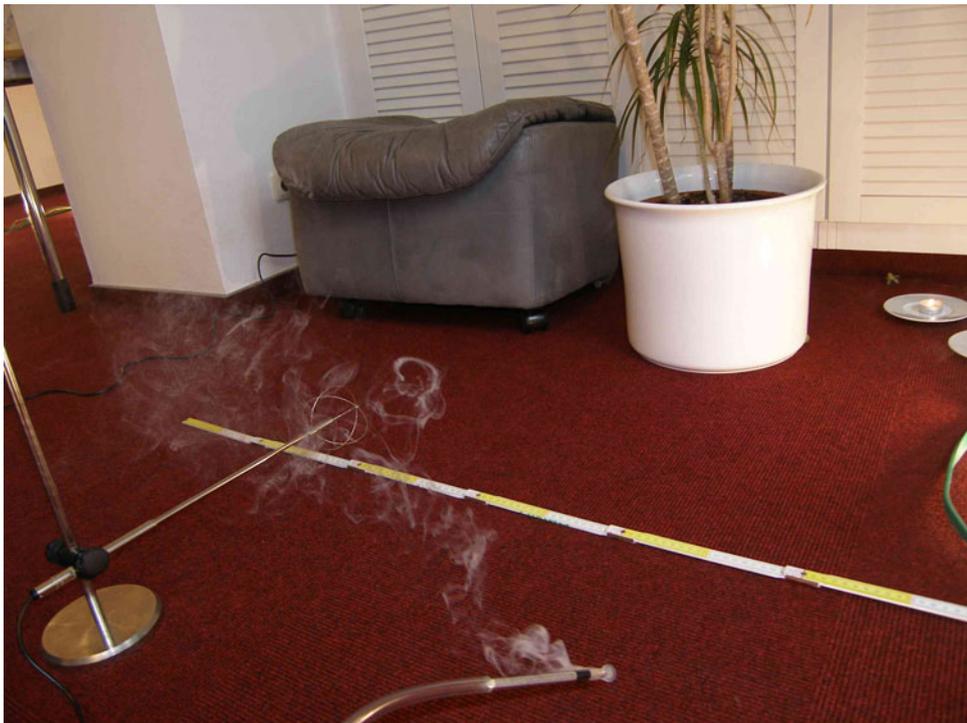


Abb. 5.25 Strömung am Boden vor ausgeschaltetem Heizkörper mit Rauchröhrchen sichtbar gemacht

Abb. 5.25 zeigt die Strömung qualitativ mit Rauch sichtbar gemacht. Auf dem Bild kann man auch die Geschwindigkeitsmesssonde in 0,1 m Höhe am Stativ erkennen.

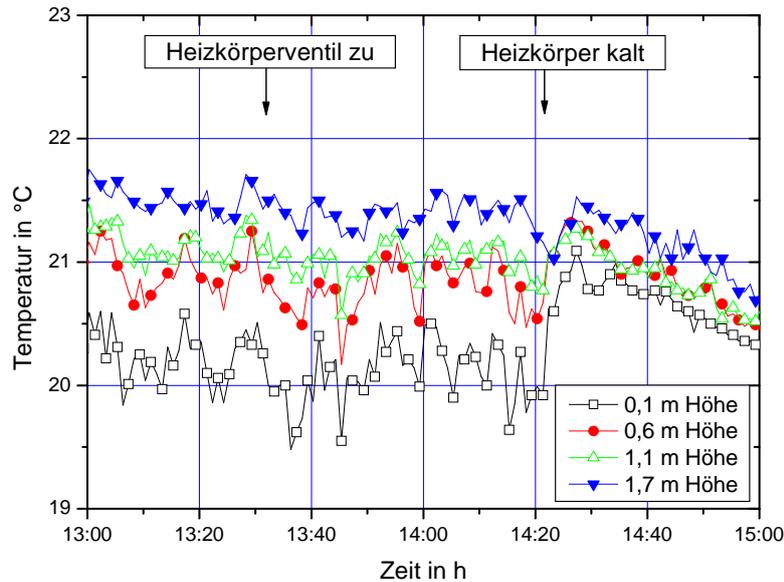


Abb. 5.26 Temperaturverlauf am Stativ im Raum

Interessant ist der Temperaturverlauf am Stativ bei ein- und ausgeschaltetem Heizkörper. Solange alle Heizkörper eingeschaltet sind, bis 13:32 Uhr, war die Luftgeschwindigkeit im behaglichen Bereich. Die Temperaturschwankungen, die bei eingeschaltetem Heizkörper auftraten, blieben nach dem Abschalten zunächst erhalten. Die unteren Werte waren allerdings schon an der Grenze der Behaglichkeit. Die Schwankungen lassen darauf schließen, dass sich das Strömungsbild während der Abkühlphase des Heizkörpers nicht geändert hat. Es bleibt, wie auf Abb. 5.25 zu sehen ist, zunächst erhalten, ist aber instabil und schlägt bei Beginn der Geschwindigkeitsmessung um 14:22 h in die stabile Strömungsform von Abb. 5.22 mit den hohen Geschwindigkeiten um. Das ist eine wichtige Beobachtung, weil man daraus schließen kann, dass keine besonders gute Regelung des Heizkörpers erforderlich ist, um das günstigere Strömungsbild längerfristig zu erhalten. Es ist aber auch wichtig festzuhalten, dass die Zugserscheinungen nur vermeidbar sind, wenn bei der Kippfensterstellung bei der hohen inneren Last etwas geheizt wird, was eine möglichst gute Teilleistungsregelung oder Steuerung der Heizkörper erfordert. Nach 50 Minuten ist der Heizkörper soweit ausgekühlt, dass er die Strömung nicht mehr beeinflusst.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte der Einfluss des Heizkörperbetriebes nicht weiter untersucht werden.

5.2.5 Konstante Differenz der CO₂-Konzentration bei geringer Last

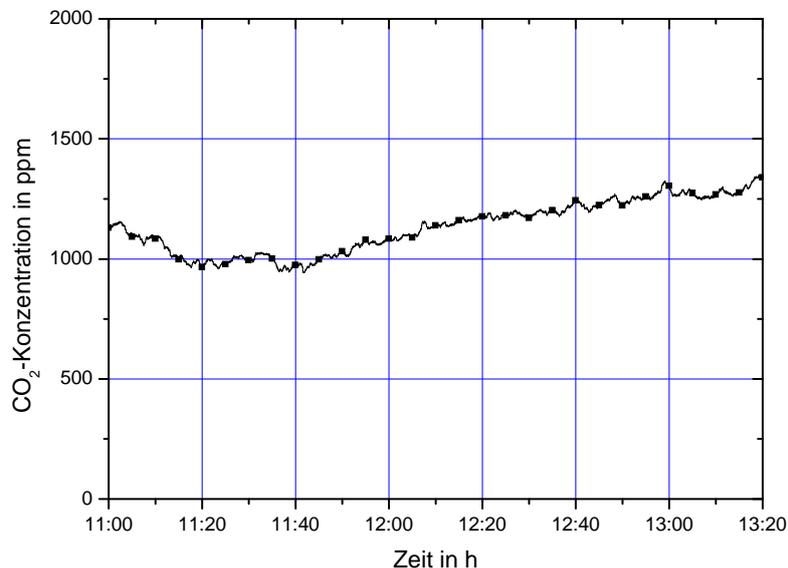
In diesem Versuch sollte bei geringer innerer Last und geringem Fensterspalt die CO₂-Konzentration konstant gehalten werden. Folgende innere Last war eingeschaltet (Tabelle 5.4):

Tab. 5.4 Sensible Leistung der inneren Wärmequellen

Quelle	Erklärung	W
Personen		816 W
Elektrische Geräte		
4 Rechner	Standby	250 W
2 Drucker		34 W
Kaffeemaschine		80 W
Beleuchtung	2*16W	32 W
		1212 W

Die äußere Last bei mittlerer Bewölkung und Sonnenschein wird zu etwa 3 kW geschätzt.

Die angestrebte Differenz der CO₂-Konzentration gegenüber der Außenkonzentration sollte 730 ppm betragen (bei einem Außenwert von 460 ppm), das entspricht einem Außenluftvolumenstrom von 160 m³/h bzw. 20 m³/h je Person. Die Kippstellung wurde nach und nach verkleinert von anfangs 7,0 cm. Sie betrug beim Erreichen einigermaßen konstanter Werte ab 11:52 h 4,0 cm. Abb. 5.26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur. Gegenüber dem Versuchsanfang nahm die Böigkeit des Windes zum Versuchsende hin zu. Die Temperaturdifferenz betrug im Mittel 13,2 K (Abb. 5.29).

**Abb. 5.27** CO₂-Verlauf bei mittlerer Last

Die Temperaturen im Aufenthaltsbereich liegen im zulässigen Bereich. Der Temperaturanstieg von 0,1 m auf 1,1 m Höhe beträgt 1,5 K bis 2 K (siehe Abb. 5.28).

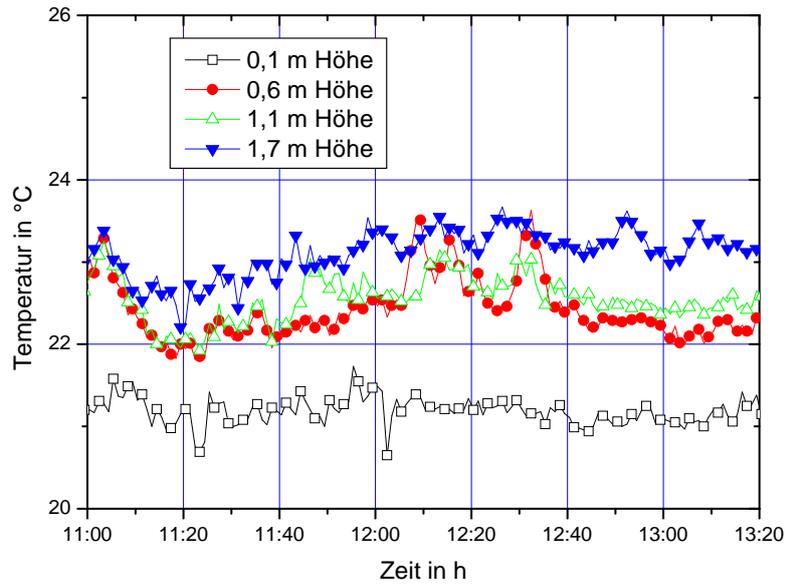


Abb. 5.28 Verlauf der Innentemperaturen am Stativ

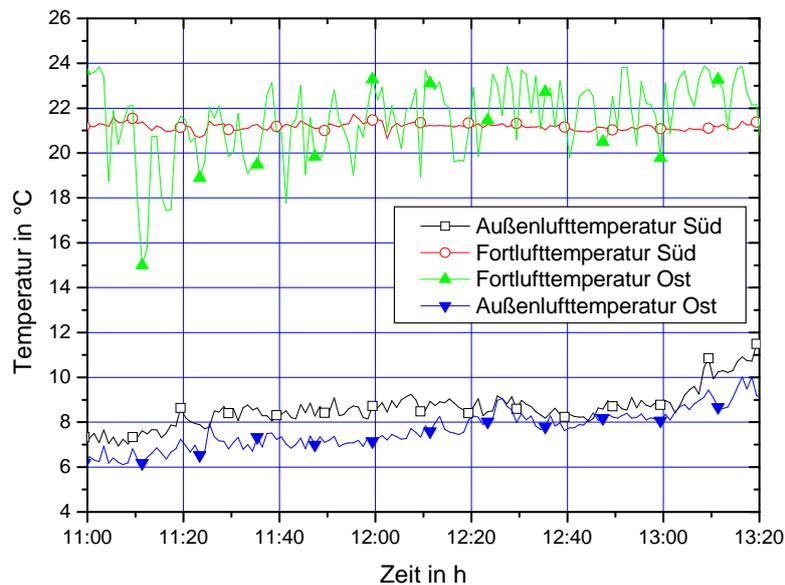


Abb. 5.29 Temperatur der Fortluft und der Zuluft an der Süd- und Ostfassade

Kühlleistung und Volumenstrom

Mit dem Volumenstrom von $160 \text{ m}^3/\text{h}$ und der mittleren Temperaturdifferenz von $13,3 \text{ K}$ ergibt sich eine Kühlleistung der Zuluft von 700 W . Die Heizkörper heizten instationär. Ihre mittlere Heizleistung betrug 1.000 W und die oben geschätzten inneren Lasten 1.212 W , sodass die Transmission ungefähr $1.500 \text{ W} + 3.000 \text{ W}$ durch die äußere Last betragen haben muss.

Es traten im Raum keine Zugerscheinungen oder zu niedrige Temperaturen auf. Der Volumenstrom lässt sich nach Extrapolation der Werte nach Abb. 3.10 bei einer Kippweite von 0,25 cm (entspricht 4 cm bei dieser Messung) und 3,63 K0,5 abschätzen. Bei der Temperaturdifferenz von 13 K ergibt sich für jedes Fenster nach Abb. 3.10 ein Volumenstrom von ca. 22 m³/h, also 132 m³/h für die 6 Fensterflügel. Das entspricht einem 0,8 fachen Luftwechsel je h. Damit kann von guter Übereinstimmung gesprochen werden. Die Übereinstimmung ist verwunderlich, denn bei dem sehr engen Spalt kommt es auf die konstruktiven Einzelheiten von Fensterflügel und Fensterrahmen an, die bei verschiedenen Fenstern sehr unterschiedlich sein können. Außerdem sind die Rahmenabmessungen selbst unterschiedlich. Der Volumenstrom ist ab 11.45 h im Mittel etwa 30 % kleiner. Aus dem Volumenstromverlauf auf Abb. 5.30 lässt sich schließen, dass die Volumenstromangaben von Abb. 3.10 eine brauchbare Näherung für den Volumenstrom für alle ähnlichen Fenster darstellt. Die Änderungen durch das Wetter sind größer als die Unterschiede verschiedener Geometrien und es lohnt sich für die praktische Anwendung nicht, weiter ins Detail zu gehen.

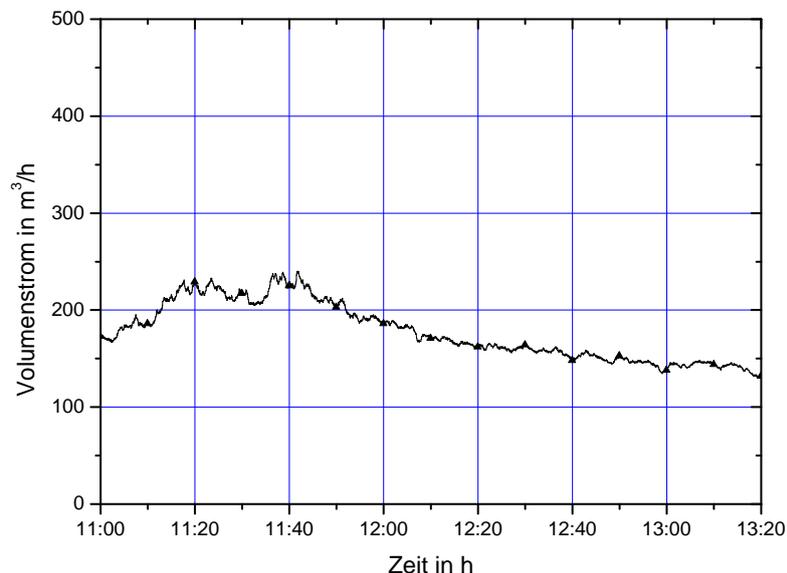


Abb. 5.30 Volumenstromverlauf bei mittlerer Last

5.2.6 Stoßlüftung

1. Versuch mit Stoßlüftung

Bei diesem Versuch wurde die Stoßlüftung angewendet. Der Versuch wurde zweimal durchgeführt. Die thermischen Lasten gleichen dem vorangegangenen Versuch mit schwacher Last.

Versuch: Ab 13:30 Uhr waren die Fenster geschlossen. Um 15:15 Uhr wurden 6 Fensterflügel auf der Südseite weit geöffnet. Die CO₂-Konzentration fiel von 15:15 Uhr bis 15:29 Uhr von 2500 ppm auf 625 ppm, wie auf Abb. 5.31 dargestellt.

Man erkennt auf Abb. 5.31 zunächst den Anstieg der CO₂-Konzentration bei geschlossenen Fenstern und den schnellen Abfall nach Fensteröffnung. In Abb. 5.32 ist der Verlauf der CO₂-Konzentration bei der Stoßlüftung noch einmal im Ausschnitt logarithmisch wiedergegeben. Diese Darstellung ist besser für die spätere Auswertung geeignet. In dieser Darstellung ergibt sich näherungsweise ein linearer Verlauf. Die Konzentrationsdifferenz halbiert sich in 3 Minuten.

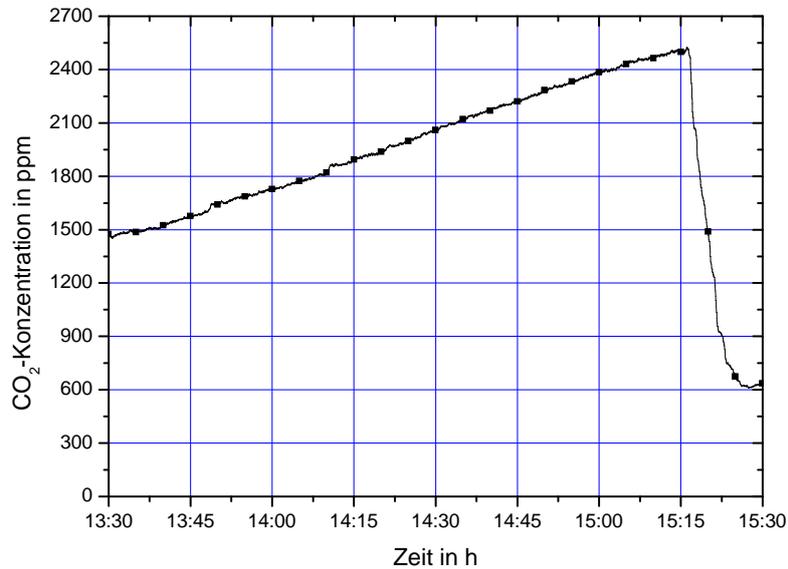


Abb. 5.31 CO₂-Verlauf bei mittlerer Last, bei Stoßlüftung

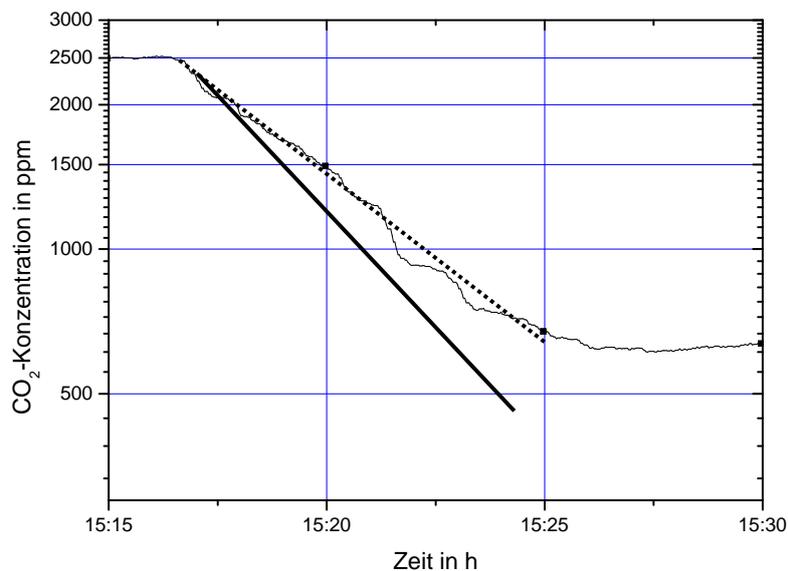


Abb. 5.32 Log. CO₂-Verlauf bei mittlerer Last bei Stoßlüftung (Detail)

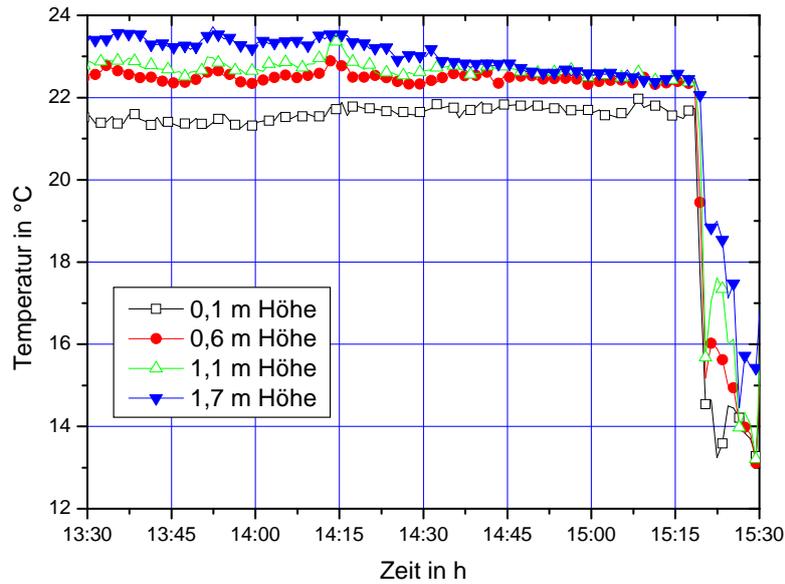


Abb. 5.33 Temperaturverlauf bei geschlossenem Fenster und bei Stoßlüftung

Abb. 5.33 stellt den Temperaturverlauf zunächst bei geschlossenen und ab 15:17 Uhr bei sechs geöffneten Fenstern in verschiedenen Höhen dar. Die Temperaturschichtung verringert sich während der Beobachtungszeit mit geschlossenem Fenster. Die Temperaturen liegen während der gesamten Zeit, in der die Fenster geschlossen waren, im behaglichen Bereich.

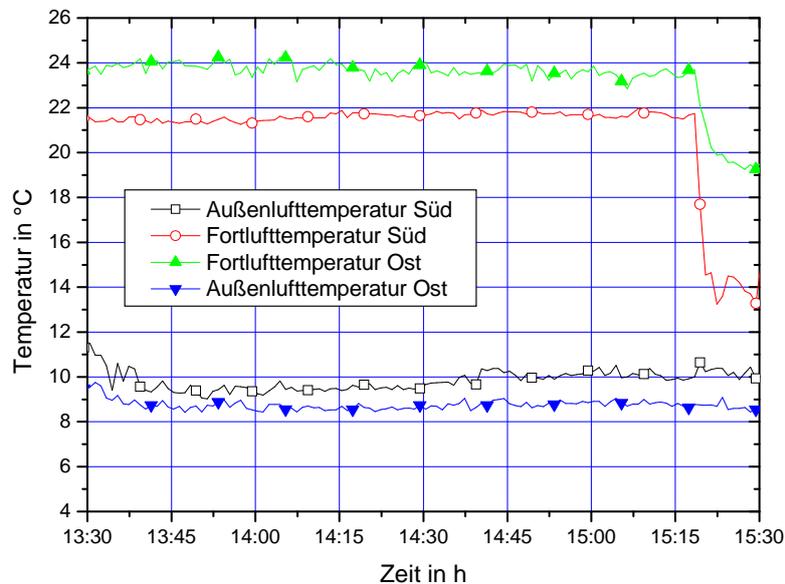


Abb. 5.34 Temperaturverlauf der Außen- und Fortluft bei Stoßlüftung

Der Temperaturverlauf an den Messstellen der Fortluft und der Außenluft ist in Abb. 5.34 wiedergegeben. Bei geschlossenem Fenster gibt es natürlich keine Fortluft, es wird dann die Lufttemperatur im Raum wiedergegeben.

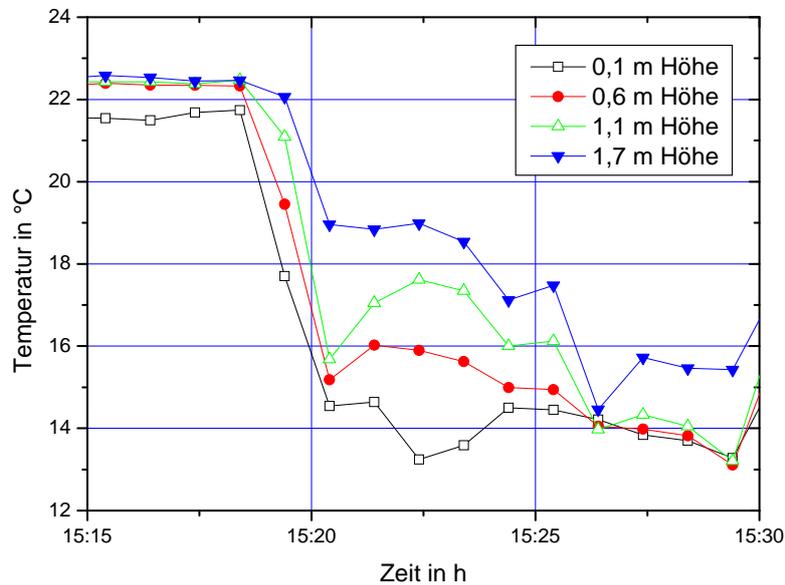


Abb. 5.35 Temperaturverlauf bei Stoßlüftung (Ausschnitt ab 15:15 h)

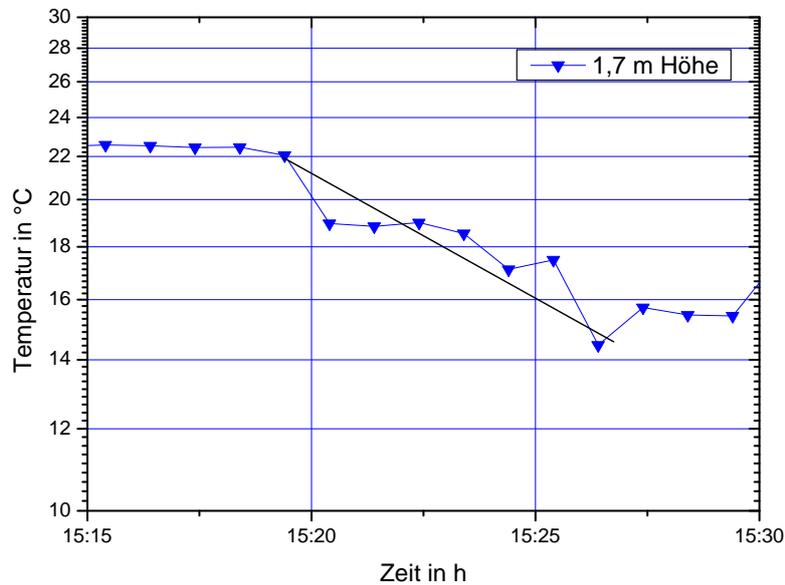


Abb. 5.36 Log. Temperaturverlauf bei Stoßlüftung in 1,7 m Höhe

Die Halbierung der Temperaturdifferenz bezogen auf die Gesamtdifferenz zwischen innen und außen tritt nach etwa 7 Minuten ein, benötigt also fast doppelt so viel Zeit wie der Konzentrationsabbau. Das ist dadurch zu erklären, dass die Raumwände

und das Mobiliar und in geringerem Umfang auch die thermischen Lasten die Luft erwärmen.

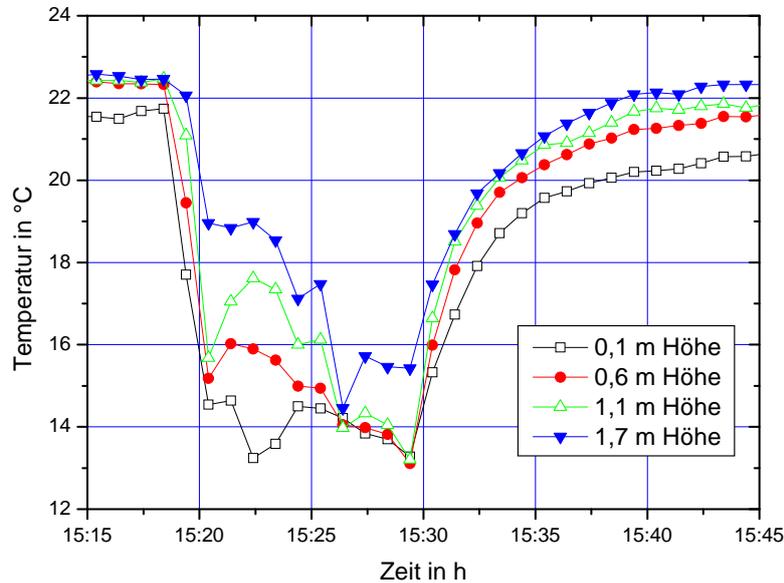


Abb. 5.37 Temperaturverlauf während und nach der Stoßlüftung in verschiedenen Höhen

Im bodennahen Bereich erfolgt eine schnellere Temperaturabnahme, wie auf Abb. 5.37 zu sehen ist. Dort ist auch das Wiederaufwärmen der Luft nach Schließen der Fenster wiedergegeben. Falls die Temperaturen im Behaglichkeitsbereich bleiben sollen, müsste die Fensteröffnung nach weniger als 1 Minute beendet werden. Die Zeit ist zu kurz, um den erforderlichen Konzentrationsabbau zu erreichen. Es müssen während der Stoßlüftungszeit unbehagliche Bedingungen in Kauf genommen werden.

Abb. 5.38 zeigt den deutlich langsameren Temperaturabfall und -anstieg an den beiden Oberflächen (Wand und Schrank). Die Wandtemperaturen sind wichtig für die Ermittlung der Zeitspanne, bis zu der wieder behagliche operative Temperaturen nach dem Schließen der Fenster eintreten.

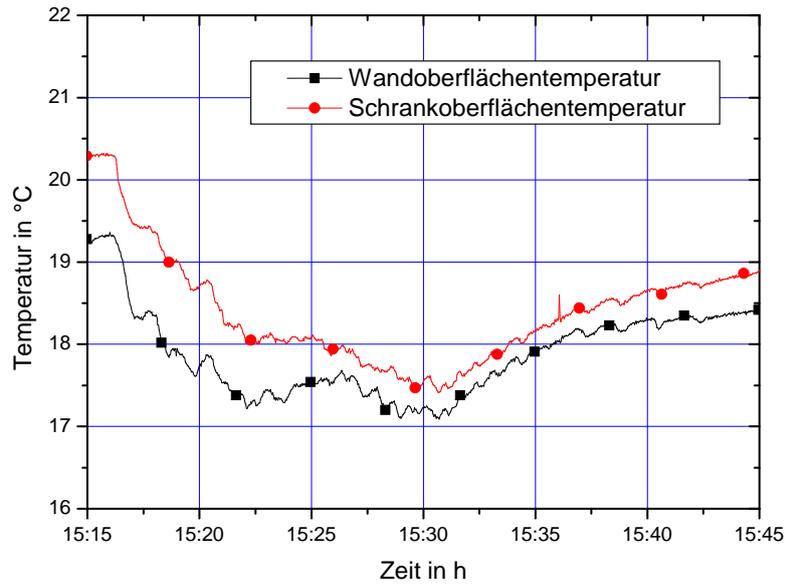


Abb. 5.38 Temperaturverlauf bei Stoßlüftung an Schrank- und Wandoberfläche

Der Luftwechsel wird nach Gl. 3.18 aus der Abklingkurve der CO_2 -Konzentration (Abb. 5.32) berechnet.

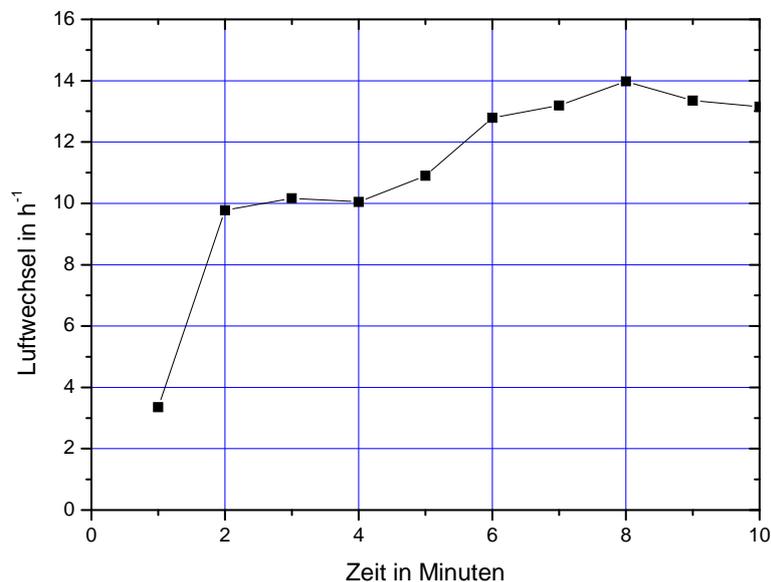


Abb. 5.39 Luftwechsel bei Stoßlüftung (1. Versuch)

Abb. 5.39 zeigt den Verlauf des Luftwechsels, der sich aus der Konzentrationsabnahme im Raum ergibt. Die Messwerte im 2-Sekunden-Rhythmus ergeben zu starke Schwankungen, deshalb wurde über 60 s gemittelt. Dadurch wird der Anstieg am Anfang nicht richtig wiedergegeben. In den ersten 4 Minuten tritt ein etwa 10-facher

Luftwechsel ein, der nach etwa 5 Minuten noch einmal bis auf 14-fach ansteigt, um dann abzufallen.

Abb. 5.40 zeigt den Verlauf der Leistung, die sich aus dem eintretenden Volumenstrom und der Temperaturdifferenz der aus- und eintretenden Luft bei der Stoßlüftung ergibt. In den ersten 2 Minuten steigt die Leistung von null auf etwa 4 kW an, um dann wieder abzufallen. Während der Fensteröffnung stellt sich näherungsweise eine Leistung von 3 kW ein. Der Anstieg nach 5 Minuten ist verwunderlich, weil die Temperaturdifferenz während der Öffnungszeit abnimmt. Hier liegt vermutlich Wind-einfluss vor.

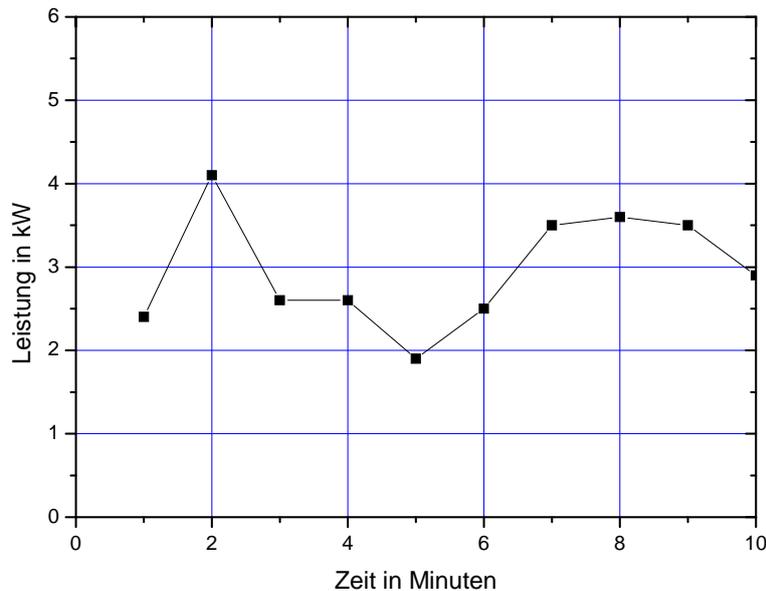


Abb. 5.40 Leistung der einströmenden Luft bei Stoßlüftung (1. Versuch)

2. Versuch mit Stoßlüftung

Der Anstieg der CO_2 -Konzentration (Abb. 5.41) verläuft ähnlich wie beim ersten Versuch (Abb. 5.31). Der Versuch wird allerdings bei geringerer Konzentration begonnen und beendet. Auch das Abklingen der Konzentration und der Konzentrationsdifferenz in Abb. 5.42 verhält sich ähnlich wie beim ersten Versuch mit Stoßlüftung (Abb. 5.32). Die Konzentrationsdifferenz klingt in 3 Minuten auf den halben Wert ab.

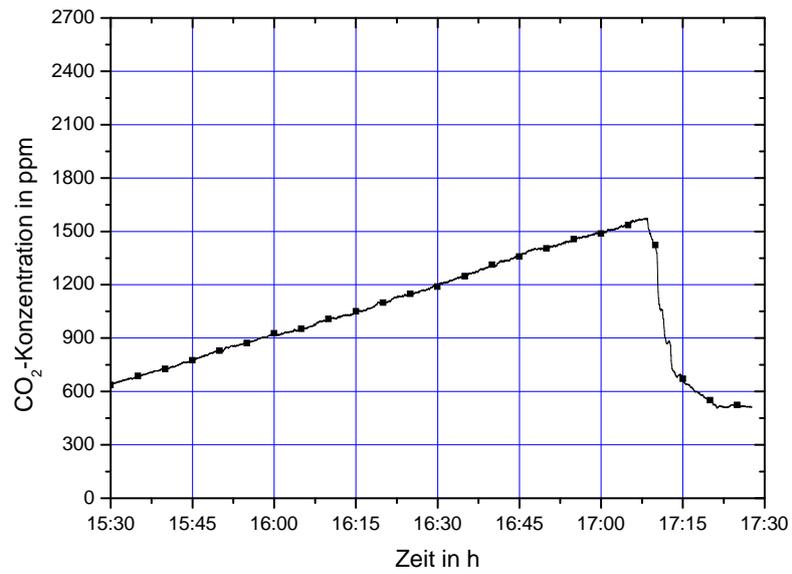


Abb. 5.41 Verlauf der CO₂-Konzentration vor und während des 2. Stoßlüftungsversuchs

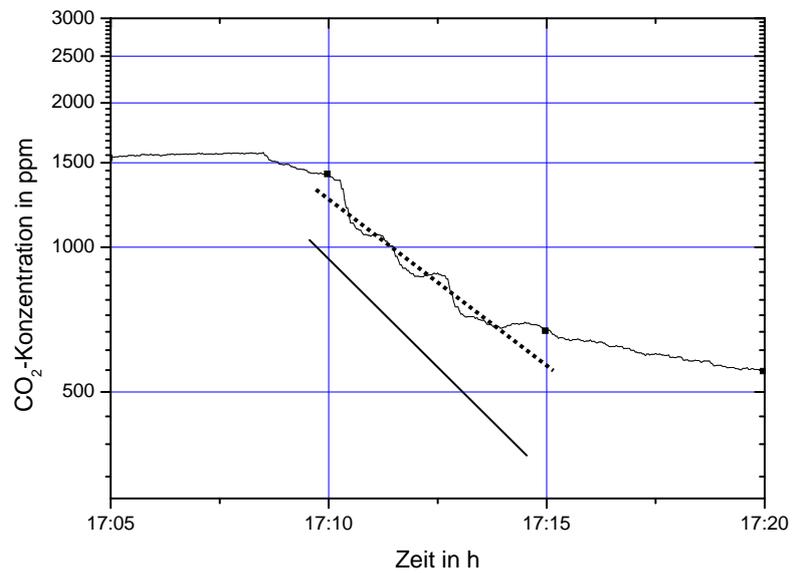


Abb. 5.42 Verlauf der log. CO₂-Konzentration beim 2. Stoßlüftungsversuch

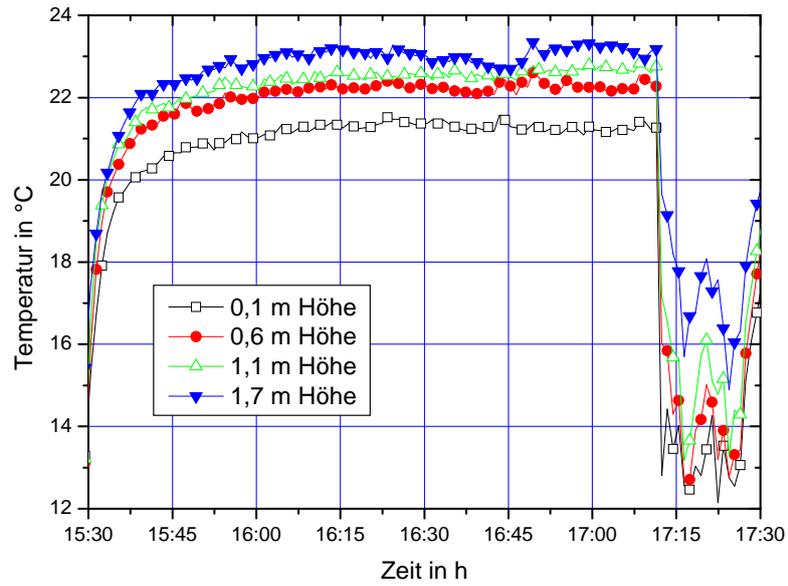


Abb. 5.43 Temperaturverlauf bei mittlerer Last bei geschlossenem Fenster und Stoßlüftung (2. Versuch)

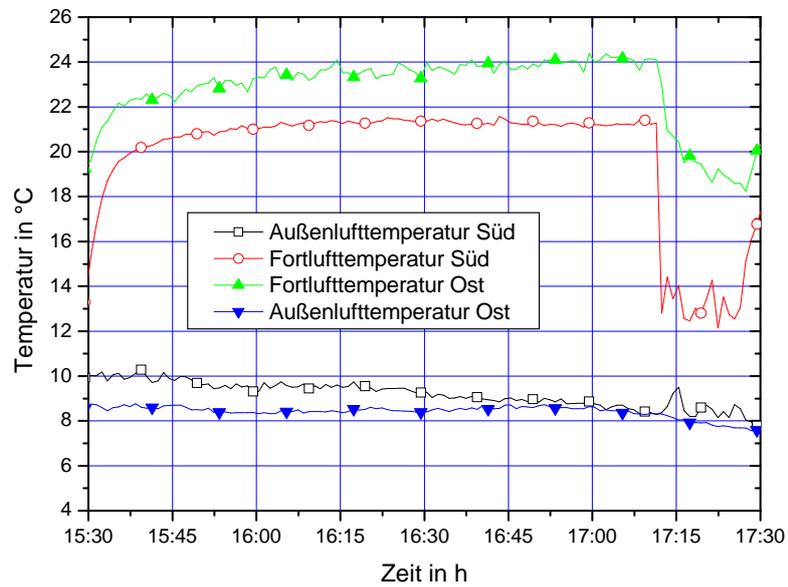


Abb. 5.44 Temperaturverlauf der Außen- und der Fortluft (2. Versuch)

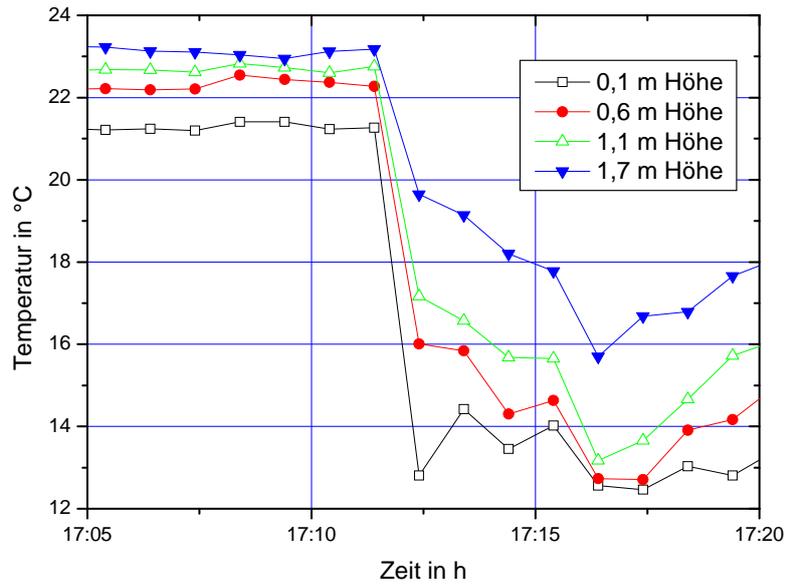


Abb. 5.45 Temperaturverlauf in verschiedenen Höhen

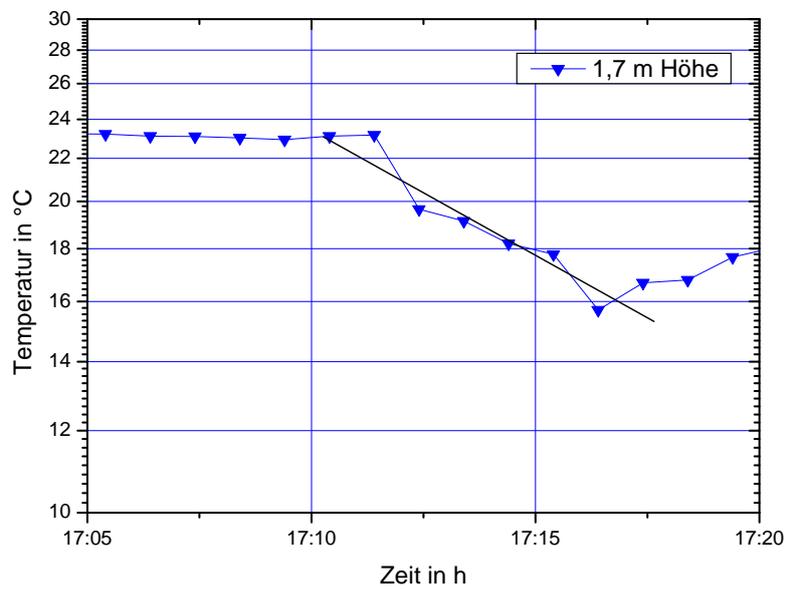


Abb. 5.46 Log. Temperaturverlauf in 1,7 m Höhe

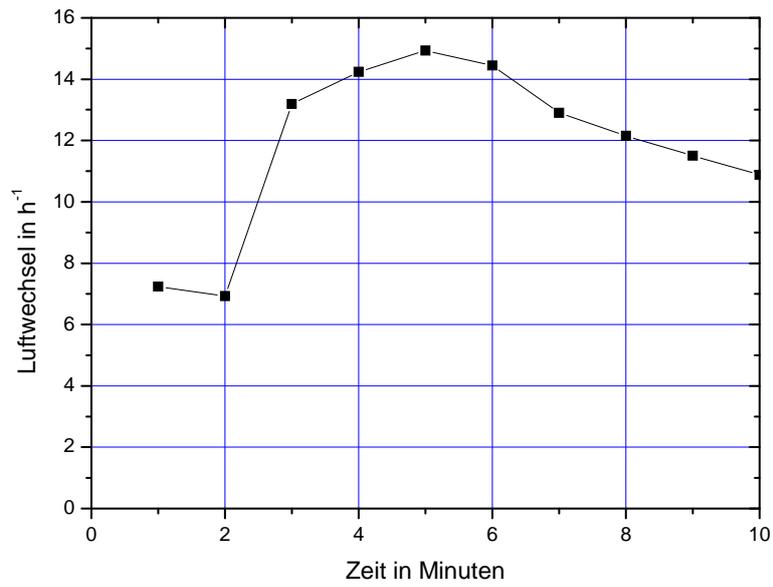


Abb. 5.47 Luftwechsel bei Stoßlüftung (2. Versuch)

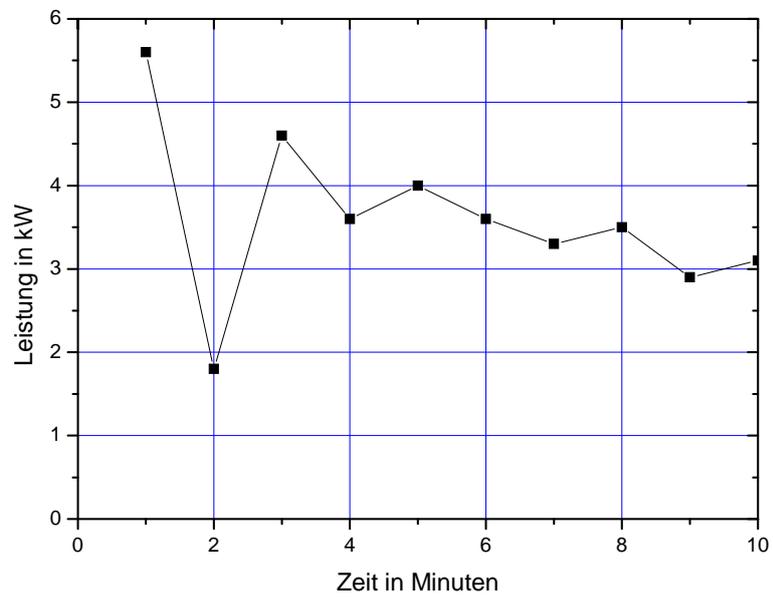


Abb. 5.48 Kühlleistung der einströmenden Luft bei Stoßlüftung (2. Versuch)

Temperaturen und Lasten waren bei beiden Versuchen sehr ähnlich. Entsprechend ergeben sich für Luftwechsel und Leistung ähnliche Ergebnisse. In der Größenordnung stimmen die Ergebnisse auch gut überein, im Detail nicht. In Abb. 5.49 sind beide Ergebnisse für den Luftwechsel gemeinsam aufgetragen. Der Luftwechsel steigt in den ersten 2 bis 3 Minuten von null auf ungefähr 12,5-fach an, um dann ungefähr konstant zu bleiben. Die hohen Werte am Ende des 1. Versuches und am Anfang des 2. sind vermutlich auf Windeinflüsse zurückzuführen.

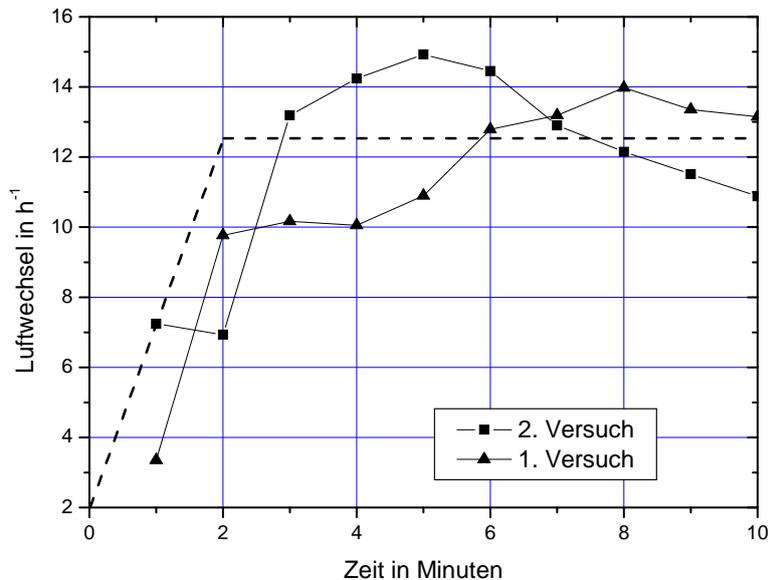


Abb. 5.49 Luftwechsel bei Stoßlüftung

Der 10-fache Luftwechsel am Anfang des ersten Versuches kann deshalb als Wert für den Fall geringen Windeinflusses angesehen werden. Abb. 5.49 gibt auch einen gemittelten Verlauf von 12,5/h wieder, der als eine gute Näherung für Stoßlüftung bei schwachem Wind angesehen werden kann.

Die Leistung gemittelt aus beiden Messungen (Abb. 5.50) steigt in den ersten Minuten an, um nach 2 Minuten einen Mittelwert von etwa 3,3 kW zu erreichen. Der ungefähr konstante Verlauf der Leistung über der Öffnungszeit ist überraschend, aber erfreulich, weil der Energieaufwand für Stoßlüftung damit leicht errechnet werden kann.

Mit dem Abfall der CO₂-Konzentration in Abb. 5.31 und 5.42 oder mit dem Luftwechsel aus Abb. 5.49 lassen sich verschiedene Szenarien der CO₂-Konzentration und mit Abb. 5.51 auch des Energieverbrauchs ermitteln und auch ein Vergleich zwischen Dauerlüftung und Stoßlüftung errechnen. Die CO₂-Konzentrationsdifferenz verringert sich bei der Stoßlüftung um den Faktor 2 in ca. 3 Minuten (Abb. 5.32 und Abb. 5.40).

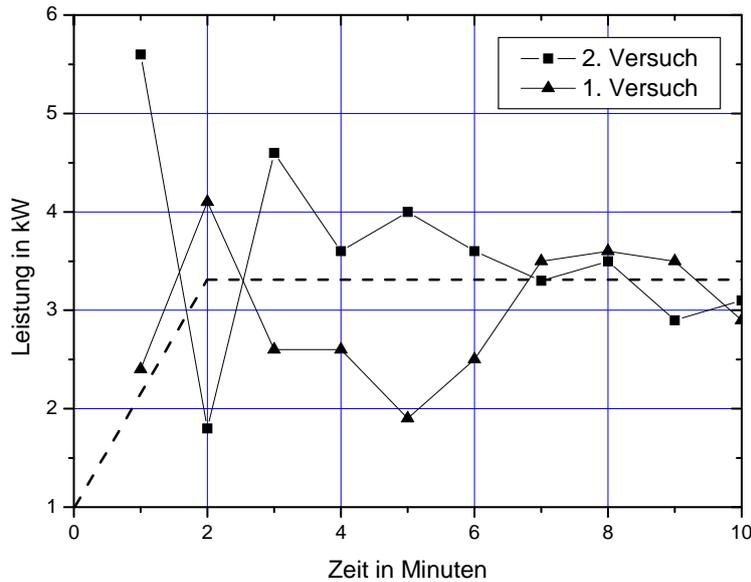


Abb. 5.50 Leistung der einströmenden Luft bei Stoßlüftung

Wie für den stationären Fall, kann man davon ausgehen, dass der Luftaustausch bei Stoßlüftung proportional zur geöffneten Fensterfläche und zur Wurzel aus der Temperaturdifferenz ansteigen wird. Entsprechend steigt die Leistung proportional zur Fläche mit einem Exponenten von 1,5.

Für den gegebenen Fall mit der Annahme, dass die Luft nicht durch die inneren Lasten, sondern durch Heizung erwärmt werden muss, lässt sich der Energiebedarf für stationäre Lüftung und Stoßlüftung errechnen. Angenommen, die CO₂-Konzentration soll zwischen 1.200 ppm und 800 ppm schwanken, dann müsste die Stoßlüftung 3 min lang betrieben werden. Der Anstieg der Konzentration um 400 ppm dauert 40 min (Abb. 5.31), so dass nach 40 min neue Stoßlüftung erforderlich wird. Die Zeit der Stoßlüftung bezogen auf die Gesamtzeit beträgt also $3/43=0,07$. Die aufzubringende Heizleistung also

$$3,3 \text{ kW} \cdot 0,07 = 0,231 \text{ kW.}$$

Mit der gleichen Leistung könnte in einer Stunde ein stationärer Luftaustausch von 53 m³/h betrieben werden, der nach einer Stunde zu einer CO₂-Konzentrationserhöhung von 566 ppm, nach zwei Stunden aber schon von 987 ppm geführt hätte. Die Stoßlüftung ist in diesem Fall nach etwa einer Stunde ungünstiger als die Dauerlüftung.

In der Realität lassen sich die Öffnungszeiten nicht so genau einstellen. Wenn beispielsweise die Stoßlüftung bei den genannten Bedingungen 5 Minuten lang durchgeführt würde, hätte die Konzentrationsdifferenz um den Faktor 2,5 auf 320 ppm abgenommen. Der Anstieg auf 1200 ppm hätte dann 45 Minuten gedauert. Das entspräche einer Dauerleistung von 0,377 kW und einem entsprechenden Dauerluftstrom von 75 m³/h. Damit hätte sich bei Dauerlüftung nach einer Stunde eine Konzentrationserhöhung von 534 ppm und nach zwei Stunden von 886 eingestellt. Nach

etwa 2 Stunden wäre die Dauerlüftung energetisch ungünstiger. Bei einem energetischen Vergleich stellt also die Zeit der Dauerlüftung einen wesentlichen Parameter dar. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte dieser Komplex nicht weiter ausgeführt werden. Es ergibt sich aber der Hinweis, dass hier noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Die Konzentration bei Dauerlüftung kann bei gleichem Energieaufwand je nach den Randbedingungen über oder unter der mittleren Konzentration bei Stoßlüftung liegen. Eine Untersuchung von GERTIS und HAUSER (1979) hatte mögliche Energieeinsparungen bei der Stoßlüftung zwischen 1 % und 4 % ergeben. Die Bandbreite ist aber je nach den Bedingungen in ausgeführten Anlagen sehr viel größer. Es ist allerdings nicht so, wie oft behauptet wird, dass bei der Stoßlüftung gegenüber der Dauerlüftung in jedem Fall viel Energie gespart werden kann.

6 Handlungsanleitung

6.1 Stationäre Lüftung (Spaltlüftung)

Stationäre Fensterlüftung ist im Sommer und Winter möglich bis zu einer thermischen Last von 30 W/m² bezogen auf die Grundfläche oder 150 W/m bezogen auf die Fassadenlänge. Im Sommer wird es bei höheren Lasten zu warm.

Im Winter kommen nur Kippfenster infrage und es ist als weitere Bedingung zu beachten, dass die Außentemperaturen über 6 °C liegen müssen, um eine Mindesttemperatur von 20 °C an den Füßen und Luftgeschwindigkeiten unter 20 cm/s sicherzustellen. An der unteren Temperaturgrenze von 6 °C empfiehlt es sich, die Raumlufttemperatur im Mittel anzuheben bis zu 25 °C. Je Kippfenster ist die maximale Kühlleistung auf etwa 340 W begrenzt.

Öffnungen im Raum für den Luftaustausch im Winter sind möglichst weit nach oben zu legen. Kippfenster mit der größten Öffnung oben, sind gut geeignet, weil sie diese Anforderung weitgehend erfüllen. Drehflügel und Schiebefenster sind nicht geeignet. Wenn die Personen gleichmäßig im Raum verteilt sind, sollen die Öffnungen auch gleichmäßig über den Raum verteilt sein. Je 30 m² ist mindestens ein Kippfenster, besser 1 Kippfenster je 10 m² zu öffnen. Alle Fenster müssen möglichst die gleiche Kippstellung einnehmen.

Die Kippweite der Fenster sollte leicht einstellbar und fixierbar sein. Wegen der häufig erforderlichen Anpassung der Kippweite sind Stellmotoren als Antrieb zweckmäßig, die die gleiche Kippweite aller Fenster in einem Raum und die Fixierung der Stellung sicherstellen. Die Kippweite sollte zwischen wenigen Millimetern und 20 cm stufenlos arretierbar sein. Maximale Kippweiten handelsüblicher Fenster liegen bei 13 cm bis 15 cm. Zur Nutzung der Fensterlüftung bis an die Einsatzgrenzen, sollten größere Kippweiten ermöglicht werden.

Bei ungleichmäßiger Raumbelastung sind die Fenster zu öffnen, die möglichst weit von der nächsten Person entfernt sind. Die Kippweite der Fenster muss nach der Differenz der Temperatur zwischen innen und außen eingestellt werden. Abb. 3.10 gibt einen Hinweis auf die erforderliche Kippweite bei verschiedenen Temperaturdifferenzen und gewünschten Volumenströmen. So muss für 60 m³/h je Fenster die Kippweite zwischen 30 cm (2*14 cm bei einer Temperaturdifferenz von 1 K) und 6 cm bei einer Temperaturdifferenz von 16 K variiert werden können. Die kleinen Kippweiten sollten bis zu 0,5 cm einstellbar sein, um den Windeinfluss ausgleichen zu können.

Der Luftaustausch ist proportional zur Wurzel aus der Temperaturdifferenz und ungefähr proportional zur Kippweite des Fensters. Abb. 3.10 lässt sich ungefähr annähern durch

$$q = 190 * k * H^{1,5} * \sqrt{\Delta\Theta} \quad (6.1)$$

mit q in m³/h, k in m und H in m.

Damit können für unterschiedliche Raubelegungen und unterschiedliche Temperaturdifferenzen die Abbildungen Abb. 6.2 und Abb. 6.3 für die Ermittlung der erforderlichen Kippstellung genutzt werden. Aus Abb. 6.1 können die einzustellenden Spaltflächen bezogen auf die Bodenfläche entnommen werden.

Abb. 6.1 stellt die spezifische Leistung als Funktion der Außentemperatur dar. Parameter ist die geöffnete relative Spaltfläche des Fensters. Die relative Spaltfläche ergibt sich aus der Fläche des Fensterspaltes (Fensterhöhe x Breite x Kippweite) bezogen auf die Grundfläche des Raumes je Person. In unserem Fall entspricht eine spezifische Spaltfläche von 0,014 einer Kippweite von 8,5 cm. Eine spezifische Spaltfläche von 0,021 stellt bei den meisten Kippfenstern die maximale Öffnung dar. Bei größeren Öffnungsweiten muss das Fenster als Drehflügel benutzt werden.

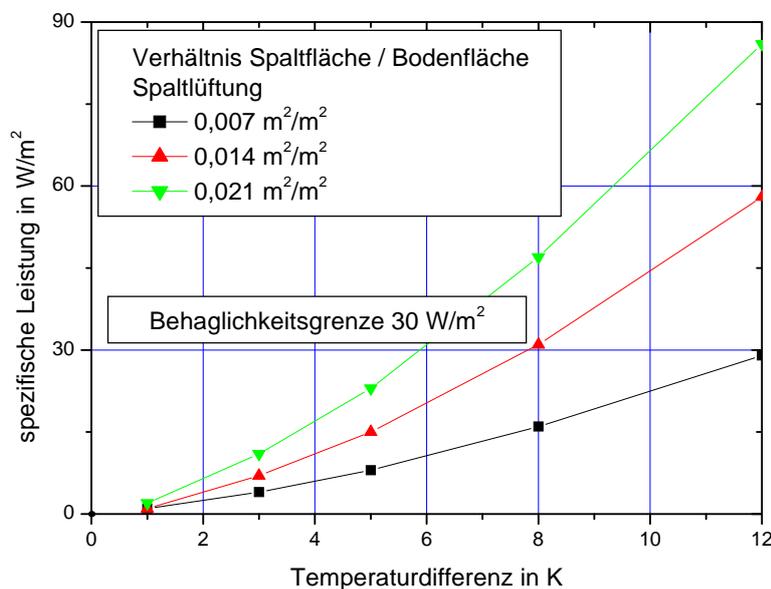


Abb. 6.1 Spezifische Leistung abhängig von der Temperaturdifferenz innen – außen

Die stationäre Lüftung kann nur angewendet werden bis zu thermischen Lasten von 30 W/m^2 bzw. 150 W/m Fassadenlänge. Die inneren Lasten können nicht vollkommen die Heizleistung der Heizkörper ersetzen. Es ist nicht angebracht, die Heizkörper abzuschalten, wenn die Spaltlüftung arbeitet. Damit nicht zuviel geheizt wird, sollte die Heizung außentemperaturabhängig ab Temperaturen unter 10 °C gesteuert werden. Wenn es möglich ist, sollte ein möglichst großer Abstand der Personen vom Fenster gewählt werden.

In den Abbildungen 6.2 und 6.3 werden die erforderlichen Kippweiten in cm für verschiedene Fensterabmessungen dargestellt. Als Parameter wird der personenbezogene Volumenstrom verwendet, der bei einer Quellstärke von 18 l/h CO_2 zu der angegebenen stationären Konzentrationserhöhung führt. Abb. 6.2 gilt für eine Fensterhöhe von ca. 1,3 m, bei einer Breite von 1 m bis 2 m. Abb. 6.3 gilt für eine Fensterhöhe von 2,0 m, bei einer Breite von 1 m bis 2 m. Beide Abbildungen gelten für eine Belegdichte von 1 Person / 10 m^2 . Ausgenommen sind die schwarz markierten

Punkte rechts im Diagramm, bei denen behagliche Bedingungen nur sichergestellt werden können, wenn die Belegungsdichte auf 1 Person / 20 m² reduziert wird.

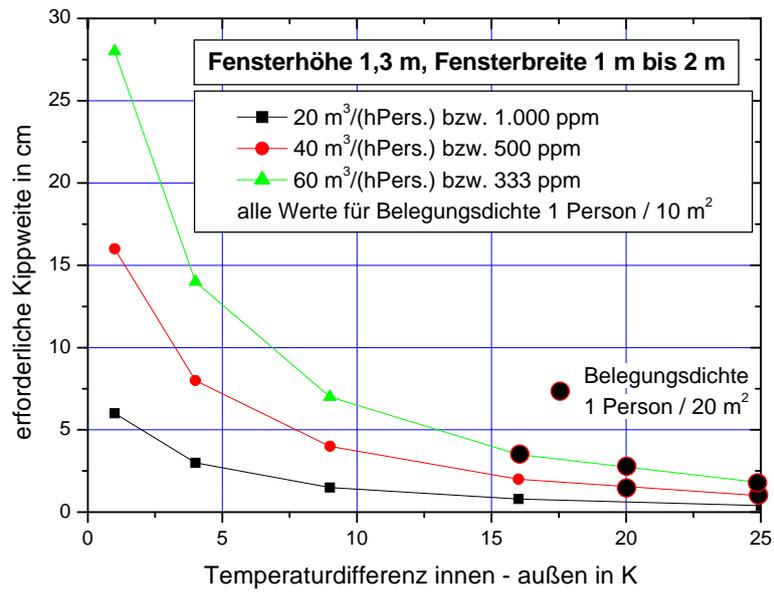


Abb. 6.2 Erforderliche Kippweite bei einer Fensterhöhe von 1,3 m

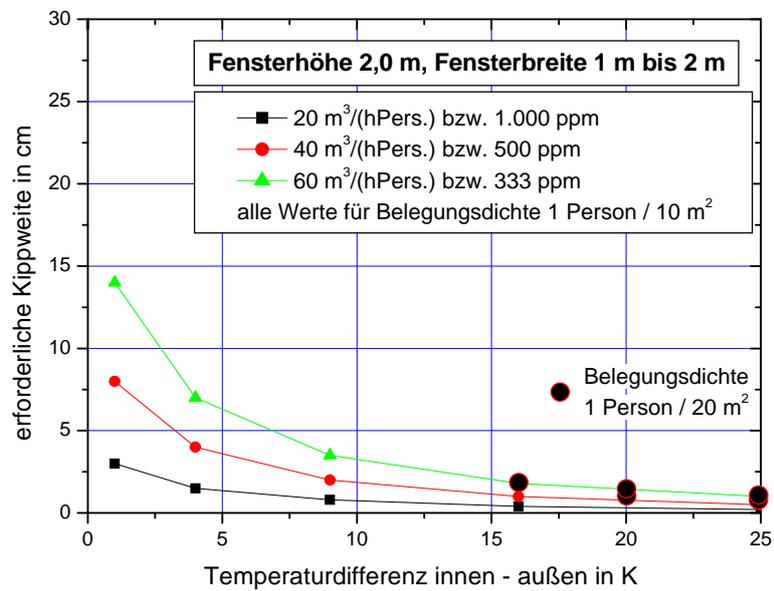


Abb. 6.3 Erforderliche Kippweite bei einer Fensterhöhe von 2,0 m

6.2 Stoßlüftung

Stoßlüftung ist anzuwenden, wenn die oben genannten Grenzen überschritten werden. Es empfiehlt sich dann, eine Kombination aus stationärer Lüftung und Stoßlüftung, da die reine Stoßlüftung im kurzfristigen Vergleich keine energetischen Vorteile bietet und höhere CO₂-Konzentration vermieden werden sollten. Wenn im Winter die Außentemperaturen unter 6 °C liegen oder die thermischen Lasten über 30 W/m², sollte die Kippweite der Fenster soweit reduziert werden, dass die Temperaturen am Boden im Behaglichkeitsbereich bleiben. Bei Versammlungs- und Klassenräumen wird dieser Fall häufig eintreten.

Die notwendige Dauer der Stoßlüftung für die Halbierung der Konzentrationsdifferenz wird in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz in Abb. 6.4 angegeben. Zusätzlicher Parameter ist das Verhältnis der Fensterfläche zur Grundfläche des Raumes. Die mittlere Kurve entspricht dem hier untersuchten Fall.

Der Abstand zwischen zwei Stoßlüftungen ergibt sich aus der Zahl der Personen und dem Raumvolumen. Für Raumvolumen von 25, 50 und 100 m³ können die Daten aus Abb. 6.5 entnommen werden. Sie lassen sich leicht berechnen. Die Zunahme je Minute beträgt

$$\Delta c = 18 * 1000 / (60 * V) * t \text{ in ppm} \quad (6.2)$$

bei einer CO₂-Produktion von 18 l/h, dem Volumen je P in m³ und der Zeit t in Minuten. Mit Hilfe der beiden Diagramme lassen sich Konzentrationsverläufe konstruieren. Es wird die höchste im Raum zugelassene Konzentration gewählt, z. B. 1.200 ppm bei einer Konzentration der Außenluft von 400 ppm. Mit der relativen Fensterfläche wird mit Abb. 6.4 die Öffnungszeit für die Stoßlüftung ermittelt. Die Konzentration am Ende der Stoßlüftung beträgt dann

$$(1200-400)/2 + 400 = 800 \text{ ppm}$$

Mit Abb. 6.5 lässt sich mit dem Raumvolumen je Person die Zeit ermitteln bis zur nächsten Stoßlüftung.

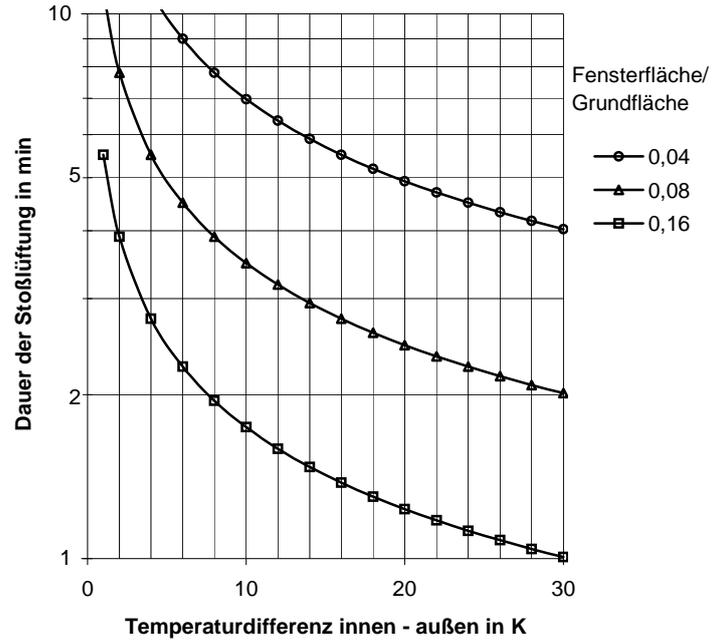


Abb. 6.4 Erforderliche Öffnungszeiten zur Halbierung der Konzentrationsdifferenz.

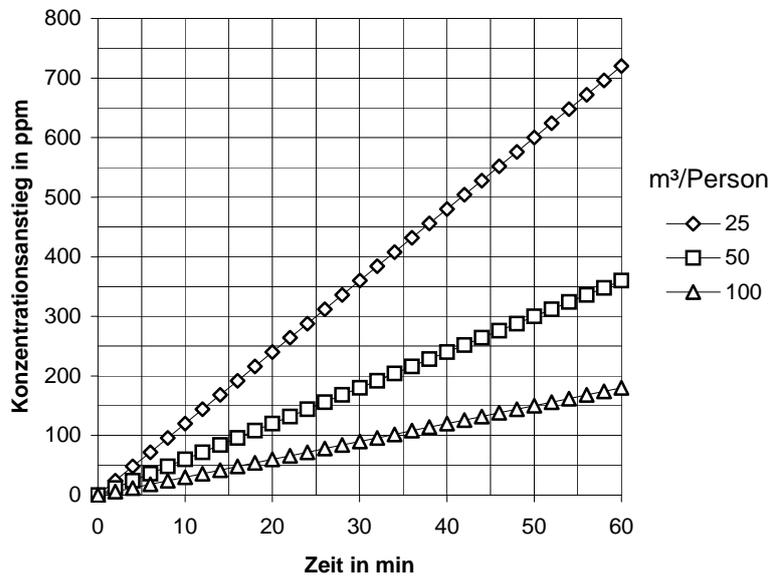


Abb. 6.5 Konzentrationszunahme mit der Zeit und dem Raumvolumen je Person

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wurden in einem Büro mit 80 m² Grundfläche die Grenzen der freien Lüftung im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit im Winter untersucht. Das Büro hatte Kippfenster, durch die die Zu- und Fortluft strömte. Die Kippweite war stufenlos einstellbar.

Es bestätigt sich die Erfahrung aus Laborversuchen, dass die Kühlleistung der durch die Fenster eintretenden Luft 30 W/m² in einem ca. 5 m tiefen Raum nicht überschreiten darf, wenn thermische Behaglichkeit gewünscht wird. Bei anderen Raumtiefen ergibt sich als Grenze 150 W/m Fassadenlänge. Außerdem darf die Außentemperatur 6 °C nicht unterschreiten. Die Kippweite der Fenster muss je nach Außentemperatur und Windstärke auf einen bestimmten Wert eingestellt werden, und zwar bei möglichst allen Fenstern in einem Raum auf den gleichen Wert. Die Einstellung muss im Bereich von einigen Millimetern bis zu 20 cm stufenlos möglich und arretierbar sein. Der Bericht gibt Anhaltswerte für die einzustellenden Kippweiten.

Bei Überschreitung der Kühlleistung sollte die Spaltlüftung mit Stoßlüftung kombiniert oder besser eine maschinelle Lüftung betrieben werden. Energetisch ist die Stoßlüftung nicht immer günstiger als die Dauerlüftung.

Die Tabelle 7.1 gibt eine Übersicht über die Möglichkeiten der Fensterlüftung.

Tab. 7.1 Möglichkeiten der Fensterlüftung in Abhängigkeit von Kühllast und Außentemperatur

	Kühlleistung < 30 W/m²	
Außentemperatur	20 °C – 6 °C	< 6 °C
Art	Spaltlüftung Kippweite $s = f(\Delta\vartheta)$	Spalt- und Stoßlüftung Öffnungszeit $t = f(\Delta\vartheta)$ Kippweite $s = f(\Delta\vartheta)$
Voraussetzung	einstellbarer Spalt	
Einschränkung	Thermische Behaglichkeit gegeben	Behaglichkeitseinschränkung während der Stoßlüftung
	Kühlleistung > 30 W/m²	
Außentemperatur	20 °C – 6 °C	< 6 °C
Art	Spalt- und Stoßlüftung Öffnungszeit $t = f(\Delta\vartheta)$, Kippweite $s = f(\Delta\vartheta)$ oder besser maschinelle Lüftung	
Voraussetzung	einstellbarer Spalt	
Einschränkung	Behaglichkeitseinschränkung im Sommer, hohe Temperaturen	Behaglichkeitseinschränkung während der Stoßlüftung, Heizkörper gesteuert betreiben

Es gibt eine Vielfalt von Kombinationsmöglichkeiten von Fensterlüftungen. Hier wurde nur der Fall untersucht, dass die Fenster allein die Strömungsöffnung des Raumes darstellen, und der Windeinfluss konnte nicht variiert werden. Der untersuchte Fall ergibt die größte Kippweite und ist deshalb von allen Varianten am wichtigsten. Bei Wind oder anderen zusätzlichen Antrieben des Luftaustausches müssen die Kippweiten entsprechend kleiner eingestellt werden.

Die Stoßlüftung konnte nur in einer einzigen Messreihe untersucht werden, die aber schon zahlreiche Fragen zur Stoßlüftung klären kann. Auf diesem Gebiet besteht sicherlich noch weiterer Forschungsbedarf.

Es zeigte sich schon, dass Stoßlüftung energetisch nicht generell günstiger ist als Spaltlüftung. Das gibt einen Hinweis darauf, dass übertrieben hohe Anforderungen an die Dichtheit der Fenster fraglich sind, wenn mit Fensterlüftung gearbeitet werden soll.

Eine Kippweite der Fenster von mindestens 20 cm sollte möglich sein. Die Kippweite muss in kleinen Schritten leicht einstellbar und fixierbar sein. Wegen der häufig erforderlichen Anpassung der Kippweite sind Stellmotoren als Antrieb zur Verstellung der Kippweite zweckmäßig.

Literaturverzeichnis

ASHRAE (2005): ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 16.4, Airflow around buildings. 2005

Blum (Herg.) (2001): Doppelfassaden. Verlag Ernst und Sohn, 2001

Behne, M. (1995): Temperatur-, Luftgeschwindigkeits- und Konzentrationsverteilungen in Räumen mit Deckenkühlung. Dissertation, TU Berlin, 1995

Bischof, W., u. a. (2003): Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden. Ergebnisse des ProKlimA-Projektes, Fraunhofer IRB Verlag 2003

Brinkmann, W. (1980): Zur Bestimmung des Lüftungswärmebedarfes hoher Gebäude. Dissertation, TU-Berlin, 1980

CEC (1992): Commission of the European Communities, Working Group 6, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings. Report No. 11, 1992

Daler, R., Hirsch, E., Haberdia, F., Knöbel, U., Krüger, W. (1984): Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau, Forschungsbericht BMFT-FB-T 84-028

Daler, R. (1996): Feuchtigkeitsabfuhr aus Wohnungen durch natürlich Lüftung. IFT Rosenheim, 1996

Feustel, H. (1984): Beitrag zur theoretischen Beschreibung der Druck- und Luftmassenstromverteilung in natürlich und maschinell gelüfteten Gebäuden, VDI-Bericht Reihe 6 Nr. 151, VDI Verlag Düsseldorf, 1984

Finke, U. (2002): Dezentrale Außenluftansaugung von raumluftechnischen Geräten. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH). Heft 8, 2002

Finke, U. (2006): Neue Behaglichkeitskriterien für mechanisch belüftete Gebäude. Gi-Gesundheitsingenieur, 127 Heft 3, Oldenbourg Industrieverlag München, 2006

Finke, U.; Fitzner, K. (1996): Bestimmung der empfundenen Luftqualität in Bürogebäuden - Ergebnisse und Wertungen, Gi Gesundheitsingenieur, Oldenbourg Industrieverlag München, Heft 4, 1996

Fitzner, K. (1996): Lüftungs- und Heizungstechnik in Schulen von Rietschel bis heute. Gi-Gesundheitsingenieur, 117 Heft 5, Oldenbourg Industrieverlag München, 1996

Fitzner, K. (2001): Raumklima, Behaglichkeit, Raum- und Gebäudedurchströmung in Blum (Hrsg.) Doppelfassaden. Verlag Ernst und Sohn, 2001

Fitzner, K. (2003): Productivity, in: Per Eric Nilsson (Herausgeber): Achieving the Desired Indoor Climate, Studentlitteratur 2003, Schweden

Gertis, K. G.; G. Hauser (1979): Energieeinsparung durch Stoßlüftung? HLH 30/3 (1979), S. 89 - 93

Gores, I.; Reske, M.; Fitzner, K. (2001): Impact of Air Flow Pattern and Thermal Load in a Room on the Heat and Mass Transfer Coefficient across a Person, especially on the Evaporation of Water from the Eyes. Clima 2000/Napoli World Congress 15.-18.09. 2001, Italien

Hall, M. (2004): Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern. Bauphysik 26, Heft 3, 2004

Hausladen, G. (2005): Clima Design, Callway Verlag München, 2005

Hebgen, H.; Püttmann, H. (1988): Bauphysikalische und bautechnische Grundlagen. RWE Bauhandbuch, Energie-Verlag, Heidelberg, 10. Ausgabe, 1988

Heiselberg, P.; Svidt, K.; Nielsen, P.V. (2001): Characteristic of air flows from open windows. Building and Environment 36 (2001)

Hellwig, R. (2005): Natürlich behaglich – spezifische Aspekte thermischen Komforts in Verwaltungsgebäuden. Dissertation TU München, 2005

Heinz, E. (1992): Probleme der effektiven Lüftung von Mehrfamilienhäuser. Tagungsband IV, Seite 143, DKV, 1992

Heinz, E. (2000): Kontrollierte Wohnungslüftung. Verlag für Bauwesen, Berlin, 2000

Isa (2006): Katalog Isa VentControl GmbH, Bad Oeyenhausen 2006

Kriegel, K.; Zeidler, O. (1999): Influence of Air Flow Patterns in a Room on Evaporation and Humidity Distribution around a Heated Wet Cylinder, Indoor Air '99, Edinburgh

Lieb, R.-D. (2006): Freie Durchströmung großer Glashallen – Freie Kühlung großer Glashallen, Vortrag auf dem Hermann-Rietschel-Kolloquium, 2006

Maas, A. (1995): Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung, Dissertation an der Gesamthochschule Kassel, 1995

Markfort, D.; Heinz, E. (2004): Thermische Behaglichkeit bei der Wohnungslüftung über Außenwanddurchlässe (ALD). GI Gesundheitsingenieur Heft 4, 125, 2004

Pettenkofer, M. (1858): Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta'sche Buchhandlung, München, 1858

Pültz, G. (2002): Bauklimatischer Entwurf für Moderne Glasarchitektur. Passive Maßnahmen der Energieeinsparung. Angewandte Bauphysik, Berlin 2002

- Recknagel-Sprenger-Schramek (2004):** Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag München, 72. Aufl. 2004
- Richter, W. (1983):** Lüftung im Wohnungsbau, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1983
- Richter, W. (2003):** Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Heizperiode – ; Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 991, Wirtschaftsverlag NW, Dortmund, Berlin, Dresden 2003
- Rouvel, L.; Kolmetz, S. (1997):** Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen. Gi Gesundheitsingenieur Heft 2, 118, 1997
- Schmidt, M. (1982):** Funktion und Berechnung von Luftschleusen, VDI-Bericht Reihe 6 Nr. 99, VDI Verlag Düsseldorf, 1982
- Seppänen, O.; Fisk, W. (2004):** Effect of Ventilation on Health and other Human Responses in Office Environment, Roomvent Sept. 2004 Coimbra, Portugal
- Wagner, R.; Roth, H. W.:** Raumtemperierung mit Fensterlüftung, CCI 05/2007
- Wargocki, P. Seppänen, O. (ed.), Andersson, J., Boerstra, A., Clements-Croome, D., Hanssen, St. O. (2006):** Indoor Climate and Productivity in Offices, REHVA Guidebook No 6
- Wildeboer, J. (2007):** Thermische Behaglichkeit und Lüftungseffektivität mit freier Lüftung. Dissertation, TU Berlin, 2007
- Wildeboer, J.; Fitzner, K.; Müller, D. (2006):** Einsatzgrenzen der freien Lüftung, HLH Bd. 57 (2006) Nr. 6 und Nr. 7
- Zeidler, O. (2001):** Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden, VDI-Bericht Reihe 19 Nr. 134, VDI Verlag Düsseldorf, 2001
- Zeidler, O.; Finke, U.; Fitzner, K. (2004):** Fensterlüftung in Bürogebäuden. Deutsche Bauzeitschrift, Bauverlag, Gütersloh, 10/2004
- DIN 1946 Teil 6 Entwurf:** Wohnungslüftung, 12/2006, Beuth Verlag Berlin
- DIN 4701:** Berechnung des Wärmebedarfs ersetzt durch DIN EN 12851, Beuth Verlag Berlin
- DIN FB 79 (1999):** Lüftung von Gebäuden – Auslegungskriterien für Innenräume, deutsche Fassung des CEN-Berichtes CR 1752
- DIN EN 13779 (2007):** Leistungsanforderungen für raumluftechnische Anlagen, 2007/09, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 15251 (2007):** Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. 2007/08 Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 7730 (2006): Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit, 2006/05, Beuth Verlag, Berlin

VDI 6022/1 (2006): Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte, Beuth Verlag, Berlin, 2006/4

Symbolverzeichnis

A	Fläche in m ²
DR	Zugluftrisiko in %
G	Gewicht in N
H, h	Höhe in m
PD	Prozentsatz Unzufriedener in %
R	Gaskonstante für Luft
T	Absolute Temperatur in K
T _u	Turbulenzgrad in %
V	Raumvolumen in m ³ , ausnahmsweise auch Volumenstrom
c	Konzentration eines Spurengases in der Luft ppm
c _p	Druckbeiwert in %; spezifische Wärme in kJ/(kg K)
clo	Einheit Wärmewiderstand der Kleidung
h	Höhe in m
g	Erdbeschleunigung in m/s ⁻²
k	gemessener Rahmenabstand incl. Rahmen, Kippstellung cm
m	Einschnürungsfaktor
met	Einheit für die körperliche Aktivität
n	Luftwechsel in h ⁻¹
p	absoluter Luftdruck
Δp	Druckdifferenz in Pa
q	Volumenstrom, auch Quellstärke z. B. einer CO ₂ -Quelle in m ³ /h
s	Kippweite cm (lichte Weite des oberen Spaltes)
t	Zeit in s oder h, ausnahmsweise auch Temperatur
v	Luftgeschwindigkeit in m/s
w	Geschwindigkeit der ungestörten Windströmung in m/s
Θ	Temperatur in °C
Θ _a	lokale Lufttemperatur in °C
Θ _i	Innenlufttemperatur in °C
Δ $\overline{\Theta}$	Mittlere Temperaturdifferenz in K
Θ	Anströmwinkel des Windes in °
Φ	Wärmestrom in W
ρ	Dichte in kg/m ³
φ	Bezogener Wärmestrom in W/m ²
Δ	Differenz

Indizes

a	außen, steigend
e	Endwert
v	Außenluft
o	Anfangswert
CO ₂	Kohlendioxid
O	operativ (bei Temperatur)
L	Luft
R	Raum
S	Strahlung (bei Temperatur)
1	unten
2	oben
G	Grund, Boden