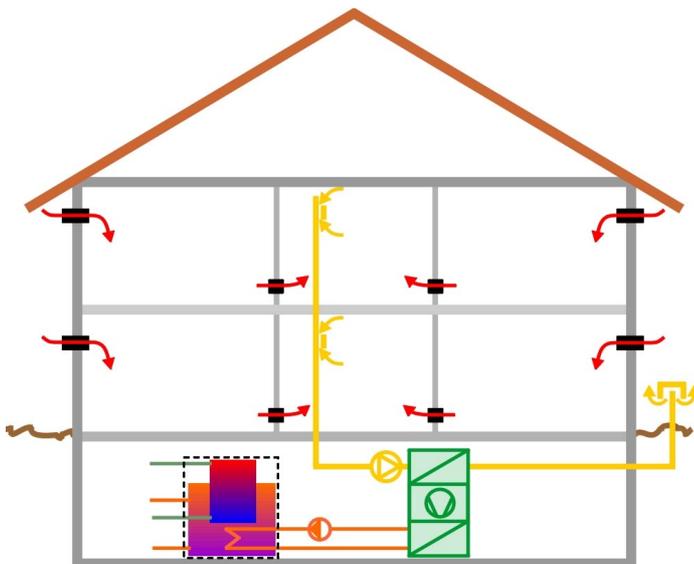


Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL)



EMPA Energiesysteme/Haustechnik

Zürcher Hochschule Winterthur

Gröbly Fischer Architekten

Mit Unterstützung des

Bundesamtes für Energie

Juni 2002

Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL)

EMPA Energiesysteme/Haustechnik

Zürcher Hochschule Winterthur

Gröbly Fischer Architekten

Mit Unterstützung des

Bundesamtes für Energie

Juni 2002

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik, Dübendorf
Zürcher Hochschule Winterthur, Winterthur
Gröbly Fischer Architekten, Forch

Projektleitung:

Viktor Dorer EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik

Redaktion:

Andreas Pfeiffer EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik
Viktor Dorer EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik

Autoren:

Viktor Dorer EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik
Andreas Pfeiffer EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik
Prof. Dr. Peter Hartmann Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW)
Adrian Schatz Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW)
Judith Wydler Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW)
Peter Gröbly Gröbly Fischer Architekten
Ueli Fischer Gröbly Fischer Architekten

Weitere Mitarbeiter im Projekt:

Frieder Emrich EMPA Abt. Akustik
Beat Margelisch EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik
Rudi Blessing EMPA Abt. Bauphysik
Marcel Kägi Student, Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW)
Andreas Bühler Student, Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW)

Begleitgruppe:

H. P. Bürgi, Minergie Agentur Bau
B. Fischer, KlimaSuisse
M. Hartmann, Avenco AG
H. Huber, Hochschule für Technik+Architektur Luzern
H.P. Oechsli, Oechsli+Partner
R. Schmidlin, Schmidlin AG
M. Stettler, BFE Bereichsleiter Gebäude
M. Zimmermann, BFE Programmleiter "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

2002

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, 8600 Dübendorf (zen@empa.ch • www.empa.ch/ren, Haustechnik)
ENET, 9320 Arbon (enet@emas.ch • www.energieforschung.ch)

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	6
Summary.....	8
2. Einleitung	9
2.1. Ausgangslage.....	9
2.2. Projektziele und -inhalt	9
2.3. Stand der Forschung.....	9
2.4. Zum Bericht	10
3. Abluftanlage: Systemfragen.....	11
3.1. Anforderungen.....	11
3.2. Luftführung im Raum, in der Wohnung und im Gebäude	12
3.3. Druckverhältnisse im Lüftungssystem	15
3.4. Einfluss von Gebäude und Aussenklima auf die Druck- und Strömungs- verhältnisse	17
3.5. Einfluss der Selbstregelung der ALD sowie der Benutzersteuerung auf die Druck- und Strömungsverhältnisse.....	20
3.6. Energieeffizienz von Abluftanlagen	21
4. Untersuchungen an Aussenluftdurchlässen (ALD)	22
4.1. Aussenluftdurchlasstypen und Konfigurationen.....	22
4.2. Volumenstrom-Kennlinien.....	24
4.3. Thermische Behaglichkeit (Zugluftrisiko).....	27
4.4. Schlagregendichtheit	35
4.5. Luftschallakustische Untersuchungen	36
4.6. Weitere Beurteilungen	38
5. Messobjekt Leuenweg	39
5.1. Kurzbeschreibung Objekt Leuenweg.....	39
5.2. Resultate Luftdurchlässigkeitsmessungen	40
5.3. Ziele der Messungen und Erhebungen	40
5.4. Zusammenfassung Resultate	41
6. Messobjekt Riedappel.....	47
6.1. Gebäude.....	47
6.2. Messungen	48
7. Referenzen und Literaturverzeichnis	49

Zeichenerklärung

Variablen			Indizes	
A	Fläche	m^2	0	Anfangszustand
	Schallabsorptionsfläche (Akustik)	m^2	8	Bei 8 Pa Differenzdruck
C	Spektrumsanpassungswert	dB	50	Bei 50 Pa Differenzdruck
D	Durchflusszahl	$m^3/(h Pa^n)$	<i>ALD</i>	Aussenluftdurchlass
	Schallpegeldifferenz (Akustik)	dB	<i>d</i>	Ausströmen (discharge)
DR	Draft Risk (Zugluftrisiko)	%	<i>e</i>	Element
n	Druckexponent	-	<i>el</i>	Elektrisch
n_L	Luftwechsel	h^{-1}	<i>ges</i>	Gesamt
p	Druck	Pa	<i>L</i>	Luft
Q	Energie	kWh	<i>n</i>	Normbezogen
R	Schalldämmmass	dB	<i>R</i>	Raum
S	Prüffläche	m^2	<i>r</i>	Beurteilung
T	Absolute Lufttemperatur	K	<i>res</i>	Resultierend
	Nachhallzeit (Akustik)	s	<i>T</i>	Nachhallzeitbezogen
Tu	Turbulenzgrad	%	<i>th</i>	Thermisch
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m^2K	<i>tot</i>	Total
V	Volumen	m^3	<i>tr</i>	Tieffrequenzbereich
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s	<i>W</i>	Wand (Fassade ohne ALD)
v	Luftgeschwindigkeit	m/s	<i>w</i>	Bewertet
x	Distanz oder Entfernung	m	<i>x</i>	In x-Richtung
α	Dimensionslose Durchflusszahl	-	<i>ZUL</i>	Zuluft
Δ	Differenz	-	(1.9)	Bezogen auf 1.9 m^2
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$		
ρ	Spezifische Dichte	kg/m^3		

Abkürzungen

AB	Aufenthaltsbereich	FBH	Fussbodenheizung
ABL	Abluft	HK	Heizkörper
ALD	Aussenluftdurchlass	IEA	Internationale Energie Agentur
AUL	Aussenluft	L/W	Luft/Wasser
BWW	Brauchwarmwassererwärmung	SD	Schalldämpfer
CFD	Computational Fluid Dynamics	WP	Wärmepumpe
ETV	Elektrothermischer Verstärkungsfaktor	WRG	Wärmerückgewinnung
EU	Europäische Union		

1. Zusammenfassung

Ausgangslage

Mit der Verbreitung des Passiv- und Minergiestandards werden im Wohnungsbau mechanische Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (kontrollierte Wohnungslüftungsanlagen) vermehrt eingesetzt. Eine alternative Lösung dazu bieten Abluftanlagen mit Abwärmenutzung aus der Abluft mittels Luft/Wasser-Wärmepumpe. Bis heute ist aber wenig Erfahrung mit solchen Systemen vorhanden und es fehlen detaillierte Planungsunterlagen.

Projektziel

Ziel des Projektes war es, Grundlagen zu schaffen für eine spätere Erstellung von detaillierten Richtlinien für die Planung und den Betrieb von Abluftanlagen mit Abwärmenutzung in Wohngebäuden.

Fragen der Lüftung, des thermischen Komforts sowie der Akustik standen dabei im Vordergrund. Energetische und betriebliche Aspekte wurden nur insoweit untersucht, als sie die Lüftung betrafen.

Projekthalt

Im Projekt wurde für verschiedene Produkte von Aussenluftdurchlässen (ALD) der thermische Komfort im Raum (Zugluftrisiko) mit Messungen in der Raumklimakammer der EMPA und mittels rechnerischer Strömungssimulationen untersucht. Verschiedene Einbaupositionen und verschiedene Wärmeabgabesysteme wurden berücksichtigt. Ebenso wurden die Volumenstromcharakteristik und das Schalldämmmass verschiedener ALD gemessen.

Als Grundlage für später zu erstellende Auslegungsrichtlinien wurden Dimensionierungsfragen und der Einfluss von Aussenklima, Gebäude (Luftdurchlässigkeit, Höhe) und Betrieb auf die Durchlüftung des Gebäudes untersucht.

Zudem wurden in zwei Gebäude mit Abluftanlagen und Abwärmenutzung Messungen durchgeführt, im ersten Gebäude Kurz- und Langzeitmessungen bezüglich Lüftung, Komfort, und Energie, im zweiten Gebäude Kurzzeitmessungen bezüglich Lüftung.

Wesentlichste Erkenntnisse

Einfluss Gebäude und Aussenklima

Bei Abluftanlagen werden auch bei relativ kleiner Luftdurchlässigkeit des Gebäudes erhebliche Anteile der Zuluft nicht über die ALD, sondern über die Gebäudeleckagen angesogen.

ALD sind deshalb auf eine tiefe Druckdifferenz zu dimensionieren (ca. 4-8 Pa). Damit steigt aber andererseits die Beeinflussung durch natürliche treibende Kräfte (vor allem durch den Kamineffekt, aber auch infolge von Wind). Überströmöffnungen (Durchlässe, Türspalt) sind auf noch tiefere Druckdifferenzen auszulegen (1-3 Pa).

Durch den Kamineffekt tendiert die Luft im Gebäude (im Winterfall) unten ein- und oben auszuströmen. Um diesen Einfluss klein zu halten, ist in mehrgeschossigen Gebäuden eine möglichst gute Luftdichtung zwischen den Geschossen nötig. Es sind volumenstrombegrenzende ALD einzusetzen, oder die Dimensionierung der ALD ist geschossweise vorzunehmen.

Luftverteilung in der Wohnung

Der Abluftstrom wird (ohne Regelung) praktisch nur durch abluftsysteminterne Faktoren (z.B. Verschmutzung der Filter) beeinflusst. Der momentane Luftdurchsatz durch den einzelnen ALD kann andererseits stark schwanken. Er ist abhängig vom Aussenklima, vom Einbauort des ALD im Gebäude, aber auch von der strömungstechnischen Konstellation der einzelnen Räume zueinander (Fenster, Zimmertüren offen oder geschlossen, Art der Überströmöffnungen). Sind z.B. Fenster und Zimmertüre in einem einzelnen Raum offen, in den anderen Räumen aber geschlossen, werden diese Räume nicht mehr mit Aussenluft versorgt!

Dieselbe Problematik besteht auch bei nach Zulufttemperatur oder nach Feuchte regulierten ALD. Wird der Abluftvolumenstrom nicht der Regelstellung der ALD angepasst, strömt die Zuluft stärker durch die noch offenen ALD nach, aber verstärkt auch unkontrolliert über die Undichtigkeit der Bauhülle. Dieser Effekt kommt natürlich umso deutlicher zum Tragen, je grösser die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle ist. Damit wird bei der Feuchte- oder Temperaturregelung eine Umlagerung der Zuluftvolumenströme auf andere Räume und auf die Infiltration erreicht, ohne jedoch den Abluftvolumenstrom und somit ggf. die Lüftungsverluste zu reduzieren.

Küchenventilator, Cheminée und Ofen

Die Aussenluftversorgung entsprechend den Planungsvorstellungen soll auch gewährleistet sein bei Einsatz des Küchenventilators. In der Küche sind deshalb zusätzliche Möglichkeiten für die Nachströmung zu schaffen. Cheminée oder Ofen sind mit einer separaten Aussenluftversorgung zu versehen. Auch in diesem Falle ist jedoch die Kombination einer Abluftanlage mit Öfen und Cheminées problematisch.

Thermischer Komfort im Raum

Für oberhalb des Fensters montierte ALD mit wandparalleler Ausblasung sind Zonen mit zugluftbedingten Komfortproblemen nur nahe der Aussenwand und ggf. entlang des Bodens zu beobachten. Diese Diskomfortzonen sind somit mehr oder weniger ausserhalb der in den Normen definierten Aufenthaltszonen. Unterhalb des ALD montierte Heizflächen reduzieren das Zugluftisiko meistens. Vorstehende Flächen oberhalb des ALD (z.B. Vorhangschiene) können den Strahl in den Raum ablenken, was zu erhöhtem Diskomfort in der Aufenthaltszone führt.

Die grössten Eindringtiefen der kalten Zuluft in den Raum ergaben erwartungsgemäss horizontal ausblasende ALD. Für solche ALD, in Brüstungshöhe montiert, bringt ein unterhalb montierter Heizkörper durch die Ablenkung des Zuluftstrahls in den Raum nicht unbedingt eine Verbesserung des Zugluftisikos.

Mit transparenten Gardinen können etwaige Zuglufterscheinungen stark reduziert werden. ALD mit integriertem Heizregister bieten eine wesentlich bessere Komfortkontrolle.

Inwieweit eine wandparallele Ausblasung des ALD zu einer Wandverschmutzung führen kann, wurde nicht untersucht.

Kenndaten ALD

Volumenstromcharakteristik

Es wurde festgestellt, dass die Produktebeschreibungen der einzelnen ALD Produkte von sehr unterschiedlicher Qualität sind. Bei den Angaben vom Hersteller muss sorgfältig abgeklärt werden, unter welchen Randbedingungen (Filtertyp, Klappenöffnung, Rahmen- resp. Wandtiefe, Schalldämpfer, ohne oder mit Wetterschutzgitter) die Volumenstrom-Druckverlust Kenndaten gemessen wurden. Ist ein Filter im ALD vorhanden, so bestimmt dieser die Volumenstromcharakteristik des ALD. Bei der Auslegung muss also ein Kompromiss zwischen Filterwirkung und Druckverlust gefunden werden. Wird die Aussenluft über einen Fassadenzwischenraum angesaugt, muss auch dieser Druckverlust bei der Planung berücksichtigt werden.

Schalldämmung

Einfache Schlitzauslässe verfügen aus Platzgründen oft über keine Schalldämmelemente. Bezüglich Akustik können solche Schlitz-ALD je nach Raum und Wanddämmung in (gemäss SIA 181) wenig bis mässig durch Aussenlärm belasteten Fassaden eingebaut werden. ALD für die Mauerdurchführung sind häufig mit ausgekleideten Rohren oder Schikanenschalldämpfern ausgerüstet. Solche ALD mit hoher Schalldämmung können auch an sehr stark belasteten Fassaden eingebaut werden (Voraussetzung: grosser Raum, gute Wanddämmung).

Schlagregen

Bei einigen der auf Schlagregen geprüften ALD war Wassereintritt bei 100 bis 150 Pa zu beobachten. Undichtigkeiten traten am Innenteil oder an den Übergängen der Teleskop-Kanäle resp. Rohre auf. Volumenstrombegrenzer hatten einen positiven Einfluss auf die Schlagregendichtigkeit.

Erkenntnisse Messobjekt Leuenweg

Die betrachteten Lüftungssysteme sind generell weit empfindlicher auf Mängel bei der Planung, der Ausführung und auch auf spätere Betriebsbedingungen, als das an sich einfache Systemkonzept erwarten liesse.

Die Kenntnisse bei Planern, aber auch die verfügbaren Planungs-/Komponentenunterlagen sind noch ungenügend. Eine entsprechend qualifizierte Planung müsste erbracht werden, lässt sich aber beim vorhandenen Kostendruck (ohne entsprechend nachdrückliche Kontrolle) kaum erbringen.

Nur eine sehr tiefe Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle lässt das System in der geplanten Art und Weise arbeiten, d.h. die erforderlichen Luftströme je Raum erzwingen.

Die Situation im Bereich der Einströmöffnungen, in Kombination mit allfälligen Wärmeabgabelementen in jenem Bereich, ist zu optimieren.

Eine eingehende Einregulierung und Abnahme solcher Abluftsysteme ist dringend notwendig. Dies erfordert eine rasche Integration der EN-Normen in CH-Normen, eine baldige Verbesserung der Planungshandbücher und deren Umsetzung in der Praxis.

Erkenntnisse Messobjekt Riedappel

Durch Ausführungsmängel auf der Abluftseite wurde das Gesamt-Lüftungssystem zum Zeitpunkt der Messungen nicht mit den geplanten, sondern mit wesentlich kleineren Luftströmen betrieben. Die Messungen waren deshalb nicht aussagekräftig. Sie wurden in der Folge abgebrochen und auf einen Zeitpunkt verschoben, bei dem das System grundsätzlich gemäss Planungsvorgaben in Betrieb sein wird.

Wird die Aussenluft durch die hinterlüftete Fassade angesaugt, muss der zusätzliche Strömungswiderstand des Spaltes berücksichtigt werden.

Das Heizregister ist am Heizkreisverteiler parallel zu den Fussbodenheizungssträngen angeschlossen. Bei hohen Wärmegewinnen und damit tiefen Heizvorlauftemperaturen kann in der Übergangszeit die Vorwärmung der Zuluft ggf. eingeschränkt sein.

Résumé

Ce projet est consacré à l'étude des points critiques des installations de ventilation simple flux (ventilation par extraction) avec ouvertures d'amenée d'air frais extérieur et récupération de chaleur de l'air extrait destinées aux immeubles d'habitation en vue de l'élaboration ultérieure de directives.

Les questions de l'amenée et de la distribution de l'air, du confort thermique ainsi que de l'acoustique ont été étudiées à l'aide de mesures en laboratoire et de simulations avec un accent particulier sur les ouvertures d'amenée d'air frais extérieur (OAFE). De plus des mesures ont été effectuées sur deux bâtiments plurifamiliaux équipés d'installations de ventilation simple flux avec récupération de chaleur.

Les résultats essentiels

Sur les immeubles équipés d'une installation de ventilation simple flux avec amenée d'air frais extérieur, une part importante de l'air frais est aspirée à travers les fuites de l'enveloppe du bâtiment, cela même lorsque ces fuites sont relativement peu importantes. C'est pourquoi il est nécessaire de dimensionner les OAFE pour de faibles différences de pression (env. 4-8 Pa), ce qui a son tour a toutefois pour conséquence d'accroître l'influence des effets de cheminée et du vent sur le renouvellement de l'air intérieur. Les ouvertures de transfert intérieur de l'air (fente au seuil des portes ou passages dans les cloisons) doivent être dimensionnées pour des différences de pression encore plus faibles (1-3 Pa). Dans les bâtiments de plusieurs étages, il faut avoir recours à des OAFE permettant un réglage du débit d'air ou procéder à un dimensionnement des OAFE étage par étage.

En absence de réglage, le débit de l'air évacué n'est influencé que par des facteurs intrinsèques au système d'évacuation d'air. Par contre le débit d'air momentané à travers les différentes OAFE dépend fortement de l'ouverture ou de la fermeture des fenêtres et des portes dans la pièce concernée. Ce problème persiste même avec les OAFE équipées d'un réglage automatique en fonction de la température ou de l'humidité de l'air. Si le débit de l'air évacué n'est pas adapté au réglage des OAFE, l'écoulement de l'air extérieur augmente à travers les OAFE restées ouvertes et encore davantage à travers les fuites de l'enveloppe du bâtiment. Dans les cuisines, il est nécessaire d'assurer des amenées d'air supplémentaires. Les cheminées et les poêles-cheminées doivent être équipés d'une amenée d'air extérieur séparée; la combinaison d'une installation de ventilation simple flux avec des cheminées ou des poêles est toutefois toujours problématique.

Avec des OAFE montées au-dessus des fenêtres ayant une sortie d'air parallèle à la paroi, des problèmes de confort apparaissent dans les zones situées à proximité de la paroi extérieure et aussi éventuellement le long du sol de cette paroi. Les OAFE montées au-dessous des radiateurs réduisent le plus souvent le risque de courants d'air. Les surfaces en saillies au-dessus des OAFE (p. ex. tringles à rideaux) peuvent dévier de flux d'air et conduire ainsi à des problèmes de confort dans la zone centrale de la pièce. Comme on pouvait s'y attendre, c'est avec les OAFE à ouverture horizontale perpendiculaire à la paroi que la profondeur de pénétration de l'air froid dans la pièce est la plus grande. La déflexion de l'air froid créée par un radiateur disposé au-dessous de tels OAFE montés à hauteur d'allège n'entraîne pas forcément une réduction des risques de courants d'air. Des rideaux légers permettent par contre de réduire fortement ces courants d'air. Les OAFE à chauffage intégré avec raccordement séparé au réseau de chauffage et réglage du niveau de température permettent d'assurer un contrôle notablement meilleur du confort.

Les indications du fabricant sur les caractéristiques de leurs OAFE doivent être contrôlées avec soins quant aux conditions marginales fixées pour la détermination de ces caractéristiques. Si l'OAFE est équipée d'un filtre, ce dernier détermine les caractéristiques de débit volumique de l'OAFE. Pour des raisons de place disponible, les prises d'air simples à fente ne sont souvent pas équipées d'éléments d'isolation acoustique et elles s'utilisent, suivant la destination de la pièce et l'isolation thermique posée, sur les façades peu ou modérément exposées au bruit extérieur. Les OAFE pour encastrement dans les murs sont souvent équipées de tuyaux munis d'un revêtement acoustique ou de silencieux à chicanes et peuvent ainsi aussi s'utiliser sur les façades fortement exposées au bruit (conditions: grande pièce, bonne isolation des parois).

Les mesures effectuées sur les bâtiments Leuenweg et Riedappel montrent que les systèmes de ventilation simple flux sont d'une manière générale plus sensibles aux erreurs commises lors l'étude du projet et de la réalisation ainsi qu'aux modifications des conditions d'exploitation que ne le laissait prévoir ce concept de ventilation assez simple en lui-même. Une attention particulière doit être accordée au dimensionnement et à la disposition des OAFE. L'ajustage et le contrôle de réception de ces systèmes sont aussi très importants. En outre, l'enveloppe du bâtiment doit être très imperméable à l'air afin que l'amenée d'air extérieur s'effectue en majeure partie à travers les OAFE.

D'une manière générale on constate que souvent l'absence de documentation et les lacunes de connaissances qui en découlent pour les projeteurs, de même que la pression exercée sur les coûts, rendent difficile une étude de projet fiable pour ces systèmes de ventilation.

Summary

The aim of this project was to evaluate critical points of residential extract ventilation systems with heat recovery, as a basis for guidelines to be established later on.

Topics of airflow rates and air distribution, of draft risk and of acoustics were investigated by laboratory measurements and by computer simulations. One specific focus was on the outdoor air transfer devices (air inlets, ATD). In addition, measurements were performed in two multi-family buildings equipped with extract ventilation and heat recovery.

Main conclusions

In extract ventilation systems, significant parts of the outdoor air are supplied through the air leakage in the building envelope and not through the ATD, even in quite airtight buildings. Therefore, ATD are to be dimensioned for low pressure differences (4-8 Pa). Such, natural pressures forces due to stack and wind have a significant influence. The design pressure difference of internal ATD (e.g. door gap) should be even lower (1-3 Pa). In multi-storey buildings, ATD should have a volume flow limitation or should be dimensioned for each floor separately.

Without control, the extract flow is influenced practically only by components in the extract side of the system (e.g. fan, filters). However, the flow through the individual ATD depends also strongly on the opening status of the windows and the internal doors in the different rooms. The same problems exist also with humidity or temperature controlled ATD. If the extract flow is not controlled, air is supplied at higher flow rates through the still open ATD, and the unintended infiltration flow through the leaks in the building envelope is increased. In the kitchen, additional air supply devices must be installed for the compensation of the hood extract flow. Open fireplaces and room stoves must be equipped with a separate outdoor air supply, however, such heating systems will in any case be problematic in combination with an extract ventilation system.

For ATD mounted above the window and with wall parallel supply jet, draft risk zones can be observed only along the outer wall and in some cases along the floor. Heating elements mounted below the ATD reduce the draft risk in most cases. Protruding elements above the ATD (e.g. curtail rail boards) may deflect the jet into the occupation zone, thus leading to higher draft risk. As expected, the highest penetration depths of the cold air supply into the occupation zone were observed for ATD with horizontal supply jet. Draft risk can be much reduced by net curtains. ATD with an integrated hot water coil for supply air preheating offer much better thermal comfort control, but may need a water supply loop and temperature level separate to the floor heating system.

Technical data from manufacturers must be checked for the conditions, under which measurements were made. If a filter is integrated in the ATD, it dominates the flow-pressure characteristic of the ATD. Simple slot ATD normally has no sound attenuation elements. They can be used in facades with low to average outdoor noise exposure, depending on room geometry and wall sound insulation. Wall mounted ATD often include sound dissipative materials in the wall duct or rectangular duct silencer and thus can also be installed in facades exposed to high outdoor noise (valid for large room and good wall sound insulation).

The measurements in the two buildings have shown that such extract ventilation systems are more sensitive on defects in the design, in the installation and on the operation conditions than could be expected from the simple system concept. ATD must be carefully positioned and dimensioned. Very important is a detailed balancing and commissioning of the system. The building has to be very airtight, otherwise large amount of the outdoor air are not delivered through the ATD but through the building leaks. In general it can be observed that a qualified design of such systems often is jeopardised on one hand by the non existence of appropriate design guidelines and the respective lack of know how of planners and designers, and on the other hand by the dominant cost restrictions.

2. Einleitung

2.1. Ausgangslage

Mit der Verbreitung des Passiv- und Minergiestandards werden mechanische Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (Komfortlüftung) vermehrt eingesetzt. Eine alternative Lösung dazu bieten Abluftanlagen mit Abwärmenutzung aus der Abluft mittels Luft/Wasser-Wärmepumpe. Aus Gründen des Temperaturniveaus und des entsprechenden Einflusses auf die Effizienz der Wärmepumpe steht dabei die Vorwärmung des Heizwassers im Vordergrund.

Im Gegensatz zu Zu-/Abluftanlagen entfallen hier erstens die Zuluftleitungen und zweitens müssen Aussenluft und Fortluft nicht am Ort des Wärmetauschers zusammengeführt werden. Ein Abluftsystem bietet deshalb insbesondere auch im Sanierungsfall verschiedene Vorteile. Es fehlen bis jetzt aber detailliertere Planungsunterlagen für diese Systeme, und es sind erst wenige Referenzobjekte genauer untersucht worden.

Da die Zuluft in der Regel jedoch ohne Aufwärmung direkt einströmt, ist den Komfortaspekten in der Nähe der Durchlässe grosse Beachtung zu schenken. Neuartige Durchlässe mit integriertem Heizregister erlauben eine Vorwärmung/-kühlung der Zuluft.

2.2. Projektziele und -inhalt

Generelles Ziel des vorliegenden Projektes war es, Abluftsysteme mit Abwärmenutzung als Alternative (vor allem für Sanierungen) zu den in Passiv- und Minergiehäusern meist eingesetzten Zu- Abluftanlagen zu untersuchen und sinnvolle Lösungen darzustellen.

Kritisch bezüglich Komfort- und Schallsituation im Raum sind in diesem Zusammenhang die Aussenluftdurchlässe (ALD). In diesem Projekt wurden deshalb solche Durchlässe durch Labormessungen und Strömungssimulationsrechnungen (CFD) evaluiert.

Zudem wurden Abluftsysteme in zwei realen Gebäuden (mit verschiedenen Durchlasstypen) bezüglich Verhalten des Lüftungssystems, thermischem Komfort und teilweise auch Energie untersucht.

Die Projektergebnisse bilden die Grundlagen für detaillierte Richtlinien für die Planung und den Betrieb von Abluft-Lüftungssystemen mit Abwärmenutzung im Bereich Wohnungsbau, sowie für Bauten mit vergleichbaren Lüftungsanforderungen (Schulen, Heime).

2.3. Stand der Forschung

Reine Abluftanlagen (meist ohne Abwärmenutzung) sind vor allem in Holland und Deutschland seit längerem verbreitet, und es liegen Arbeiten vor, welche die Aussenluftdurchlässe und die entsprechenden Komfortfragen behandeln [Hausladen, 1992], [Scholze, 1994]. Auch geht die deutsche Normung am detailliertesten auf Abluftanlagen ein [DIN 1946-6]. In Frankreich sind (durch gesetzliche Vorschriften gefördert) feuchtegeregelte Aussenluftdurchlässe verbreitet [Zirngibl, 1992].

Die umfassendsten Arbeiten zum Thema Abluftanlagen und insbesondere auch zum Thema der Aussenluftdurchlässe hat Reichel durchgeführt [Reichel, 1996], [Reichel, 1999]. Aber auch im Rahmen des IEA Projektes Annex 27 haben Sawachi et. al. in einer umfangreichen Arbeit die Komfortsituation für Aussenluftdurchlässe untersucht und daraus Diagramme für Komfortabschätzungen erarbeitet [Sawachi, 1997]. Ebenso waren und sind Gebäude mit Abluftanlagen Gegenstand von messtechnischen Überprüfungen [Werner, 1995], [Michael, 2001].

Die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle ist Thema von zahlreichen Projekten und Arbeiten in verschiedenen Ländern [Borsch-Laaks, 1993], [Steinemann, 1995]. Allerdings wird auf die ausserordentliche Wichtigkeit der Gebäudeluftdichtheit für Abluftanlagen selten spezifisch eingegangen.

Im Rahmen des EU Joule IV Projektes TIP-Vent wurde ein Abluftsystem mit sehr kleinen Druckverlusten und mit sehr effizientem Ventilator entwickelt und ausgemessen [Bulsing, 2000], [de Gids, 2000]. Dieses System hat allerdings keine Abwärmenutzung.

Ebenfalls in Holland ist ein System auf dem Markt mit elektronisch gesteuerten ALD, welche unabhängig von der Druckdifferenz einen konstanten Volumenstrom liefern. Die kommunikative Vernetzung erlaubt eine integrale Regelung aller ALD sowie des Abluftventilators. Dadurch kann die Anlage bedarfsgerecht gesteuert und Rückströmung durch die ALD verhindert werden.

Internationale Forschungsprogramme beschäftigen sich auch mit den Möglichkeiten der hybriden Lüftung (Ausnutzung natürlicher Kräfte soweit möglich, Ventilatorunterstützung sobald aus Gründen der Luftqualität nötig). Es werden auch Systeme mit Abwärmenutzung entwickelt und untersucht. [RESHYVENT, 2002].

Bezüglich der Bedarfsregelung wird immer noch auf das IEA Projekt Annex 18 Bezug genommen [Filleux, 1989], [Mansson, 1992].

Einen guten Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Wohnungslüftung und der Beurteilung der entsprechenden Systeme bezüglich thermischem Komfort, Luftqualität, Energie, Schall und Lebenszykluskosten geben die Berichte des IEA Annex 27 [Mansson, 1995], [Mansson, 2002].

In der Schweiz sind einige Abluftanlagen mit Abwärmenutzung realisiert, aber nur in wenigen Fällen publiziert, so z.B. die Überbauung Inwilerried [Löpfe, 1992]. Dieser Lüftungsanlagen-Typ ist auch für Minergiegebäude geeignet und gehört zu einer der sechs anerkannten Systemen [Minergie, 2001]. In einem Gebäude in Schötz hat es sich als vorteilhaft erwiesen, für die Gebäudeheizung eine Niedertemperatur Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W-WP), und für die Abwärmenutzung aus der Abluft eine separate L/W-WP für höhere Temperaturen (Abluft-Wärmepumpen-Boiler) einzusetzen [Afjei et. al., 2000].

2.4. Zum Bericht

Zweck des Berichtes, Zielpublikum

Der Bericht ist als technischer Bericht erstellt gemäss der Zielsetzung des Projektes, Grundlagen für später zu erstellende Richtlinien zu erarbeiten und zu dokumentieren. Der Bericht stellt also noch kein Planungshandbuch dar, sondern dokumentiert spezifische Punkte, die bei der Planung von Abluftanlagen zu berücksichtigen sind. Der Bericht richtet sich primär an Experten, Lüftungsplaner und Architekten.

Aufbau

Der Bericht ist in einen relativ knapp gehaltenen Hauptteil sowie in ausführliche Anhänge aufgeteilt. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wird im Hauptteil nur wenig auf die jeweiligen Kapitel im Anhang verwiesen.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Projekt sind zudem im Kapitel 1. zusammengefasst.

3. Abluftanlage: Systemfragen

3.1. Anforderungen

Im Folgenden sind generelle Anforderungen aufgelistet, die an eine Abluftanlage mit Abwärmenutzung und an die entsprechenden Aussenluftdurchlässe und Überströmöffnungen zu stellen sind. Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten orientieren sich an diesen Kriterien. Detaillierte Anforderungen ergeben sich aus den in Kapitel 7. aufgeführten Normen und Richtlinien. Zudem sind eventuelle lokale Vorschriften zu beachten.

Anforderungen an eine Abluftanlage mit Abwärmenutzung

- An die Luftdichtheit des Gebäudes müssen hohe Anforderungen gestellt werden. Bei mehrgeschossigen Bauten sollte zur Reduktion des Kamineffektes auch zwischen den einzelnen Geschossen eine dichte Bauweise vorhanden sein.
- Die Aussenluftversorgung soll auch beim Einsatz des Küchenventilators gewährleistet sein.
- Abluftanlage und Cheminée resp. Ofen dürfen sich gegenseitig nicht beeinflussen.
- Durch den Unterdruck im Gebäude darf keine Luft aus den Untergeschossen angesogen werden, welche eine erhöhte Radonkonzentration zur Folge haben könnte.
- Anforderungen an Filterung der Aussenluft und an Schalldämmung dürfen nicht zu einem höheren Unterdruck im Betrieb führen.
- Akustische Anforderungen sind gemäss SIA 181 (1988) festzulegen. Es hat sich gezeigt, dass dabei insbesondere bei Schlafräumen von einer hohen Lärmempfindlichkeit, resp. von erhöhten Anforderungen ausgegangen werden muss (Beurteilungspegel $L_{r,h}$ somit < 25 dB). Anforderungen an das Schalldämmmass für Aussenbauteile müssen auch mit den ALD erreicht werden können.
- Bei erhöhten Anforderungen bezüglich Schalldämmung und Filterung der zugeführten Aussenluft ist eine mechanische Zu-/Abluftanlage vorzusehen.
- Die Kontrolle und Wartung der Anlage, insbesondere auch der ALD, muss gewährleistet sein (auch in Mietwohnungen).
- Eine anlagegerechte Instruktion der Benutzer muss gewährleistet sein.

Erforderliche minimale Luftraten

Gemäss SIA 180 (1999) sind die erforderlichen Aussenluftraten aufgrund des Frischluftbedarfs von Personen sowie aufgrund der Verunreinigungs- und Feuchtebelastungen zu bestimmen. Der Aussenluftbedarf pro Person (Rauchen verboten) wird dabei mit $15 \text{ m}^3/\text{h}$ angegeben.

Sind Belegung und Belastungen nicht bekannt, so können Werte für minimale Aussenluftraten gemäss DIN 1946-6 (1998) beigezogen werden. Dabei werden erforderliche Zulufraten und Abluftraten raumbezogen spezifiziert. Bei kleinerem rechnerischem Ablufttotal muss der Wert für die Abluft auf das Zulufttotal erhöht werden. Es wird zudem nach der Wohnungsgrösse und der Betriebsdauer unterschieden.

Maximale Luftraten

Bei tiefen Aussentemperaturen und geringer Belegung resp. geringer Feuchtebelastung führen zu hohe Aussenluftraten zu einer zu tiefen relativen Raumluftfeuchtigkeit. Es ist deshalb auch aus Luftqualitätsgründen eine obere Grenze für die Luftraten zu beachten.

Energieeffizienz

Bei der Planung ist dem elektrothermischen Verstärkungsfaktor (ETV) hohe Beachtung zu schenken. Um die Energieeffizienz beurteilen und gegenüber anderen Systemen vergleichen zu können, sollte eine integrale Betrachtung des Gesamtsystems (z.B. Lüfterneuerung, Heizung und Brauchwarmwasser) vorgenommen werden.

Anforderungen an Aussenluftdurchlässe

Ein Aussenluftdurchlass (ALD) für Abluftanlagen muss im wesentlichen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Gewährleistung eines ausreichenden Aussenluftvolumenstromes
- Regulierbarkeit des Luftdurchsatzes
- Möglichst stabile Luftraten auch bei Stördrücken (Volumenstrombegrenzung)
- Schliessbar und im geschlossenen Zustand dicht
- Schutz gegen Eindringen von Insekten
- Schutz gegen Schlagregen und Hagel (auch im geöffneten Zustand).
- Raumseitig kondenswassergeschützt
- Schutz gegenüber Aussenschall (bei Anforderungen an Fenster und sonstige Aussenbauteile muss auch die Kombination mit dem ALD diese Anforderung erfüllen)
- Aerodynamische und akustische Eigenschaften gemäss Normen geprüft und in Herstellerunterlagen dokumentiert
- Wartungsarm, gut reinigbar, einfach bedienbar
- Luftführung im Durchlass und Montageort so, dass keine Zugerscheinungen im Aufenthaltsbereich des Raumes hervorgerufen werden

Anforderungen an Überströmöffnungen

Eine Überströmöffnung muss im wesentlichen folgende Anforderungen erfüllen:

- Möglichst geringer Druckverlust
- Hoher Schallschutz (dem baulichen Niveau angepasst)
- Zugluftfreiheit, vor allem beim Bad im Stehbereich
- Vermeiden von Kurzschlussströmung zwischen Zu-/Abluftdurchlass und Überströmdurchlass durch geeignete Anordnung

Überströmdurchlässe dürfen den Schallschutz der Innentüre nicht wesentlich schwächen. Bei normalen Zimmertüren ist darum ein Spalt an der Unterkante von maximal 15 mm vertretbar. Dieser reicht hydraulisch für einen Volumenstrom bis ca. 40 m³/h aus. Bei höheren schalltechnischen Anforderungen müssen spezielle schalldämmende Elemente in Wände eingebaut werden.

Anforderungen Minergie-Standard

Zur Anerkennung durch den Minergie-Standard müssen Abluftanlagen mit Abwärmenutzung folgende Anforderungen erfüllen [Minergie-Verein, 2001]:

- Elektrizitätsbedarf der Ventilatoren gegenüber Zu-/Abluftanlagen reduziert
- ALD in sämtlichen Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräumen vorhanden
- ALD mit Filter ausgerüstet
- Schalldämmung eines ALD darf nicht schlechter als ein Fenster sein
- Platzierung ALD in der Nähe von Heizkörper oder ALD mit integriertem Heizregister
- Planwert Aussenluftvolumenstrom 30 m³/h pro Raum mit Zuluftversorgung
- Planwert Abluftvolumenstrom 40 m³/h pro Raum mit Zuluftversorgung

3.2. Luftführung im Raum, in der Wohnung und im Gebäude

Luftführung im Raum

Jeder Aussenluftdurchlass (ALD) ist eine eigenständige Lüftungseinrichtung mit definierten aerodynamischen Eigenschaften, mit der sich somit eine objekt-, raum- und nutzerabhängige Belüftung realisieren lässt. Die ALD im Raum werden somit für eine raum-, flächen- oder personenbezogene Aussenlufttrate dimensioniert. Bei welcher Druckdifferenz über dem ALD diese nominellen Luftraten erreicht werden sollen, wird in Kapitel 3.4. eingegangen.

Der momentane Luftdurchsatz durch den einzelnen ALD ist gegeben durch die momentanen Druckverhältnisse an der Aussen- und der Innenseite des ALD. Diese sind stark beeinflusst

einerseits durch das Aussenklima und andererseits durch die Konstellation der einzelnen Räume zueinander in Bezug auf Strömungswiderstände (Fenster, Türen offen oder geschlossen, Art der Überströmöffnungen).

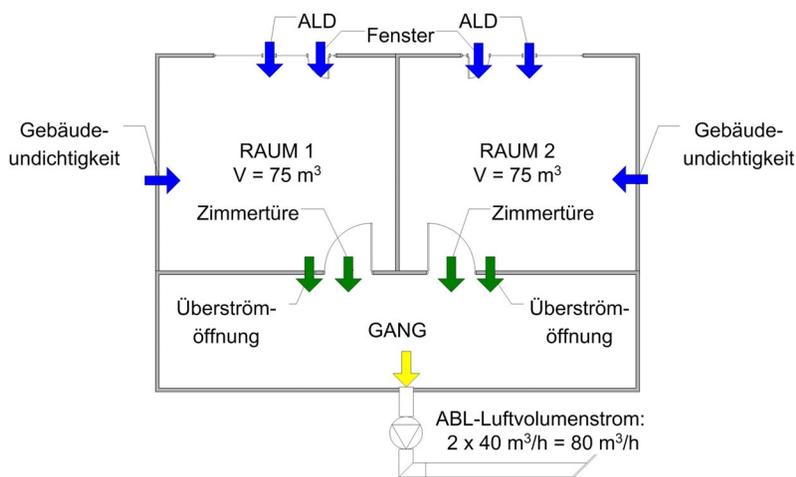
Aufgrund der Vorteile bei Montage und Kosten wird der ALD meist im Fensterrahmen eingebaut, wobei die Position oberhalb der Verglasung favorisiert wird. Eine Anordnung unterhalb oder seitlich ist jedoch auch möglich. Ein direkter Einbau in die Aussenwand (im Brüstungsbereich) hat den Vorteil, dass in den Elementen mehr Platz für Schalldämmmassnahmen und Luftfiltermatten zur Verfügung steht. Von Bedeutung ist natürlich auch, ob sich unterhalb des ALD ein Heizelement befindet oder nicht. Die Auswirkungen von Typ und Position des ALD und der Einfluss des Wärmeabgabesystems und weiterer Elemente im Raum auf den thermischen Komfort werden im Kapitel 4. erläutert.

Luftführung in der Wohnung

Bei einem Abluftsystem wird das Prinzip der Kaskadenlüftung angewendet. Die Aussenluft wird somit in Wohn-, Schlaf-, Arbeitszimmer und ggf. in der Küche über ALD zugeführt, und strömt dann durch den Korridor und ggf. durch weitere innenliegende Zonen zu den Räumen, in denen traditionell abgelüftet wird (WC, Bad und ggf. Küche).

Das System holt sich die Abluftmenge auf dem Weg des geringsten Widerstandes. Die Druckdifferenzen über die Fassade - und damit auch über die ALD - liegen im Bereich von wenigen Pascal. Bei den kleinen Druckdifferenzen bleibt der Volumenstrom selbst bei einer flachen Ventilator-Charakteristik (Axialventilator) praktisch konstant. Der Abluftstrom ist also primär durch abluftseitige Faktoren (z.B. Verschmutzung Filter, Steuerung/Regelung Ventilator) beeinflusst. Infolge der kleinen Druckdifferenzen, mit denen wegen der Gebäudeleckage gearbeitet werden muss (siehe Kapitel 3.4.), sind somit das Öffnen von Fenstern und internen Türen sowie die Überströmöffnungen von grosser Bedeutung. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde mit dem Strömungssimulationsprogramm [COMIS 3.1, 2001] ein Wohnungsmodell (Figur 3-1) analysiert.

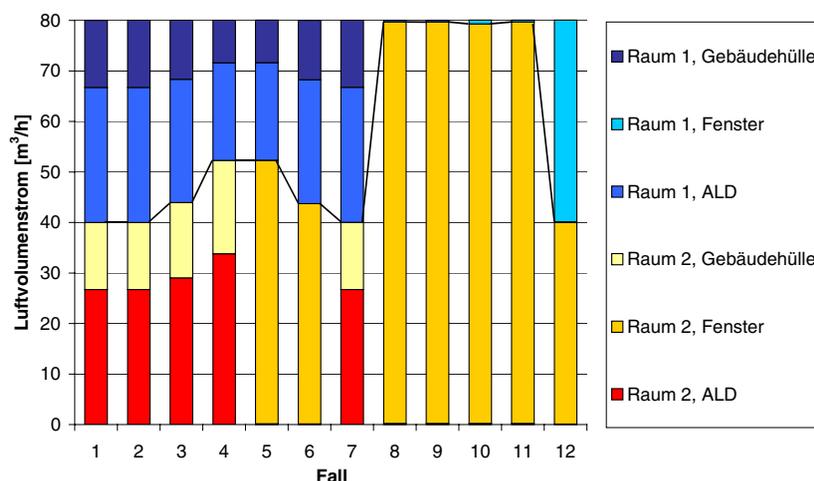
Im Extremfall, wenn in einem Zimmer Fenster und Innentüre geöffnet sind, wird alle Zuluft nur über diesen Raum eingebracht, in allen weiteren Zimmern wird infolge der so herrschenden kleinen Druckdifferenz zwischen innen und aussen keine Zuluft mehr angesogen. Diese Situation wird durch die Fälle 8 bis 11 in der Tabelle 3-1 resp. in der Figur 3-2 eindrücklich veranschaulicht. Bleibt die Zimmertüre jedoch geschlossen, strömt selbst bei einer grosszügig dimensionierten Überströmöffnung (30 m³/h@1Pa, d.h. 30 m³/h Volumenstrom bei 1 Pa Druckdifferenz) nicht mehr als 65 % der Zuluft (anstelle der 50% im Normalfall) über den Raum mit dem geöffneten Fenster nach (s. Fall 5). Damit wird deutlich, dass eine ABL-Anlage auch bei asymmetrisch geöffneten Fenstern und geschlossenen Zimmertüren weitgehend hydraulisch abgeglichen ist. Wie der Fall 6 zeigt, ist ein noch besseres Resultat für diese spezifische Situation mit einer Überströmöffnung mit grossem Strömungswiderstand zu erwarten. Leider wirkt sich diese bei einer in der Praxis häufig anzutreffenden Situation (Fenster geschlossen, eine Türe offen) negativ aus (Fall 4). Aus diesem Grund sollte die Überströmöffnung möglichst einen geringen Strömungswiderstand aufweisen (1 bis 2 Pa bei 30 m³/h wäre sinnvoll).



Figur 3-1: Wohnungs-Grundriss Konfiguration mit zwei Räumen mit Aussenluftdurchlässen und Überströmöffnungen zu der Abluftzone.

Fall	Konfigurationen					Volumenstrom		Druckdifferenz		
	Überström- öffnung	Raum 1		Raum 2		Raum 1 [m ³ /h]	Raum 2 [m ³ /h]	Raum 1 [Pa]	Raum 2 [Pa]	Gang [Pa]
		Fenster	Türe	Fenster	Türe					
1	30 m ³ /h@1Pa	zu	zu	zu	zu	40.0	40.0	3.9	3.9	5.6
2	30 m ³ /h@4Pa	zu	zu	zu	zu	40.0	40.0	3.9	3.9	12.8
3	30 m ³ /h@1Pa	zu	zu	zu	0.9 x 2.2	36.1	43.9	3.3	4.7	4.7
4	30 m ³ /h@4Pa	zu	zu	zu	0.9 x 2.2	27.8	52.3	2.1	6.3	6.3
5	30 m ³ /h@1Pa	zu	zu	1.5 x 1.0	zu	27.7	52.3	2.1	0.0	2.9
6	30 m ³ /h@4Pa	zu	zu	1.5 x 1.0	zu	36.3	43.7	3.3	0.0	10.6
7	30 m ³ /h@1Pa	zu	0.9 x 2.2	zu	0.9 x 2.2	40.0	40.0	3.9	3.9	3.9
8	30 m ³ /h@1Pa	zu	zu	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	0.3	79.7	0.0	0.0	0.0
9	30 m ³ /h@1Pa	zu	0.9 x 2.2	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	0.4	79.7	0.0	0.0	0.0
10	30 m ³ /h@1Pa	1.5 x 1.1	zu	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	0.7	79.3	0.0	0.0	0.0
11	30 m ³ /h@4Pa	1.5 x 1.1	zu	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	0.3	79.7	0.0	0.0	0.0
12	30 m ³ /h@1Pa	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	1.5 x 1.1	0.9 x 2.2	40.0	40.0	0.0	0.0	0.0

Tabelle 3-1: Zuluftvolumenströme für die beiden Räume in Abhängigkeit der Widerstände der Überströmöffnungen und der offenen oder geschlossenen Innentüren/Fenster. Gebäudeleckage: $n_{L50} = 1 \text{ h}^{-1}$, Strömungscharakteristik ALD: $30 \text{ m}^3/\text{h}@4\text{Pa}$



Figur 3-2: Luftvolumenströme für die untersuchten Fälle 1 bis 12. Dabei wurde nach der Herkunft der Zuluft (Gebäudeleckage, Fenster oder ALD) unterschieden.

Küchenabluft

Die Raumabluft der Küche kann auch zentral abgesogen und somit der Abwärmenutzung zugeführt werden. Die Ablufthaube über dem Kochherd hat eine separate Fortluftführung, da diese vom Lüftungssystem unabhängig und nur sporadisch in Betrieb ist. Da die Betriebszeiten kurz und die Verschmutzung dieser Abluft gross ist, macht eine Abwärmenutzung dort wenig Sinn. Der kurzzeitig hohe Luftvolumenstrom der Küchenabluft haube kann temporär zu Zugscheinungen führen. Darum sollte die Zuluft dort über eine separate Öffnung nahe bei der Küchenabluft haube nachströmen können. In diesem Zusammenhang wurde ein eigens dafür entwickeltes Ventil (B.I.V. Boost Intake Valve) von [TIP-Vent Partners, 2001] untersucht, welches erst bei einem Unterdruck von 25 Pa öffnet. Eine andere Möglichkeit der Kochstellenabluftung ist eine Umluftanlage mit Aktivkohlenfilter, wobei die Filterwartung relativ intensiv und teuer ist. In allen Fällen muss prinzipiell die Aussenluftversorgung gemäss Planungsvorstellungen auch bei Betrieb des Küchenventilators gewährleistet sein.

Cheminée und Ofen

Obige Ausführungen zur Küchenabluft gelten - infolge der längeren Betriebsdauer und der Sicherheitsaspekte - im verstärkten Masse beim Betrieb eines Cheminée, resp. eines raumluftgespeisten Ofens. Hier muss die Aussenluftversorgung gemäss Planungsvorstellungen in jedem Falle gewährleistet sein. Cheminée oder Ofen sind deshalb mit einer separaten Aussenluftversorgung zu versehen. Durch den Unterdruck der Abluftanlage darf kein Rauch in

den Raum gesogen werden, was oft schwierig zu verhindern ist. Feuerstellen und Öfen in Kombination mit Abluftanlagen sind deshalb in der Regel problematisch.

Luftführung im Gebäude

Das generelle Prinzip ist gegeben: Aussenluftzufuhr in den Räumen mit Bedarf für Aussenluft, Abluft zentral gefasst und der Abwärmenutzung zugeführt, und schliesslich als Fortluft zentral über Dach abgeführt. Die allgemeinen Bedingungen bezüglich der Positionierung einer Aussenluftfassung (Aussenlärm, Aussenluftbelastung, Winddruckbelastung, Beeinflussung durch Fortluft) sind hier für jeden einzelnen ALD zu beachten.

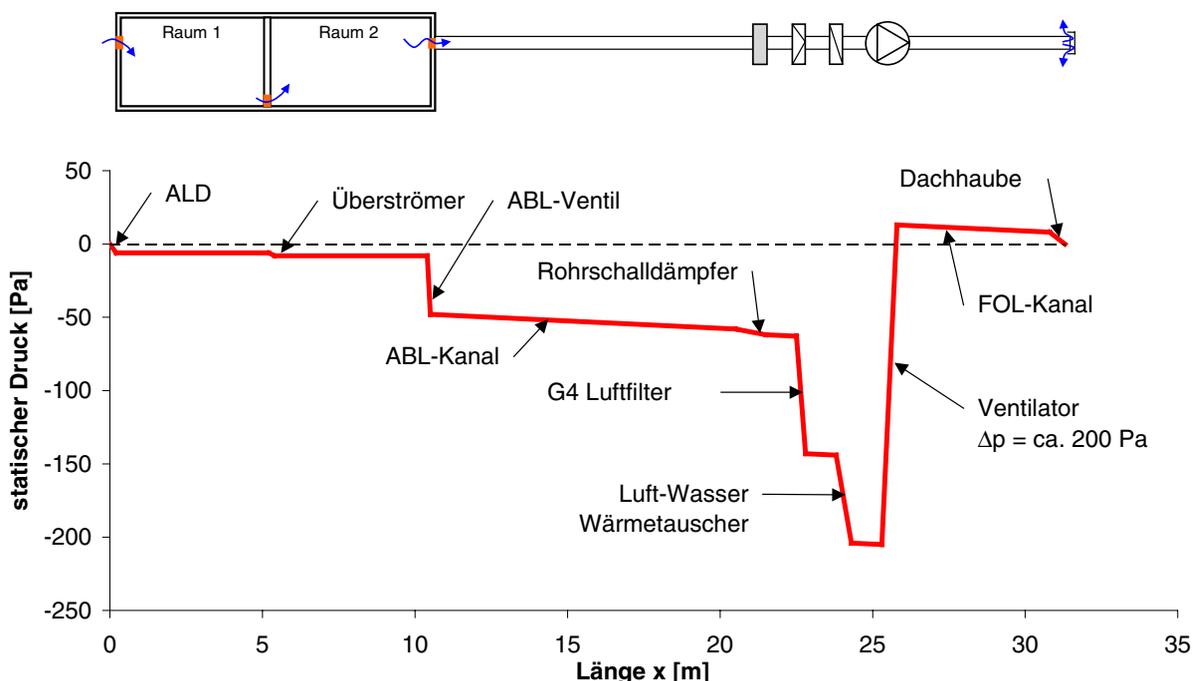
Beim Zusammenführen der Abluftstränge der einzelnen Wohnungen in einem zentralen Abluftkanal sind die Anforderungen bezüglich der Vermeidung von Geruchs-, Rauch- und Schallübertragungen zu beachten.

Die Abluft- und Fortluftkanäle sind so zu isolieren, dass weder ein zusätzlicher Wärmeverlust noch ein Kondensationsrisiko (Fortluftkanal nach Abwärmenutzung mit WP) entsteht.

3.3. Druckverhältnisse im Lüftungssystem

Typische Druckabfälle im Lüftungssystem

Im Vergleich zu den durch Rohrsystem, Filter und Wärmetauscher verursachten Druckabfall ist der Druckabfall über dem ALD und ggf. der Überströmöffnung sehr klein. Dies bedeutet, dass Druckänderungen im Bereich von zwei bis drei Pascal, welche durch Störeinflüsse (Wind oder Thermik) verursacht werden, keinen Einfluss auf die Fördermenge des Ventilators haben. Figur 3-3 zeigt einen typischen Druckverlauf vom Aussenluftdurchlass über Kanalsystem bis zur Dachhaube.



Figur 3-3: Typischer Druckverlauf vom Aussenluftdurchlass, Überströmöffnung/Türe, Abluftventil, Abluftkanal, Filter, Ventilator, WRG, Fortluftkanal bis Dachhaube

Optimierte Systeme

Figur 3-3 zeigt, dass für eine Optimierung des Lüftungssystems vor allem die Druckabfälle bei Filter und Wärmetauscher am grössten sind, dass aber auch die Abluft-Durchlässe und die Kanäle nicht unwesentlich beitragen. Im Rahmen des EU-Projektes TipVent wurde ein Abluftsystem für ein EFH (allerdings ohne Abwärmenutzung) mit einem Gesamtdruckabfall von unter 36 Pa realisiert [de Gids, 2000]. In einem weiteren EU-Projekt [Reshyvent, 2002] werden

Systeme entwickelt, die natürliche treibende Kräfte verstärkt nutzen und damit den Strombedarf für den Ventilator deutlich reduzieren.

Druckdifferenz für die Bemessung von ALD

Die Frage der Auslegungs-Druckdifferenz resp. der maximal zulässigen Druckdifferenz für ALD ist nicht eindeutig festgelegt. Druckdifferenz-Werte in DIN 1946-6 können für die Bemessung von ALD herbeigezogen werden:

Windschwache Lagen und bei Vorhandensein von raumluftabhängigen Feuerstätten	4 Pa
Windstarke Lagen (Windsituation gemäss DIN 4701-1)	8 Pa

Tabelle 3-2: Zulässiger Unterdruck in Wohngebäuden gemäss DIN 1946-6

Aus ausländischen Prüf- und Systemnormen ergeben sich nur wenig Hinweise bezüglich der Bemessungs-Druckdifferenzen, da meistens Anforderungen bezüglich Luftraten resp. Querschnittsflächen formuliert sind (siehe Tabelle 3-3). So sind in England z.B. für die Grundlüftung von Wohnräumen (background ventilation) ALD mit min. 8000 mm² Öffnungsfläche vorzusehen.

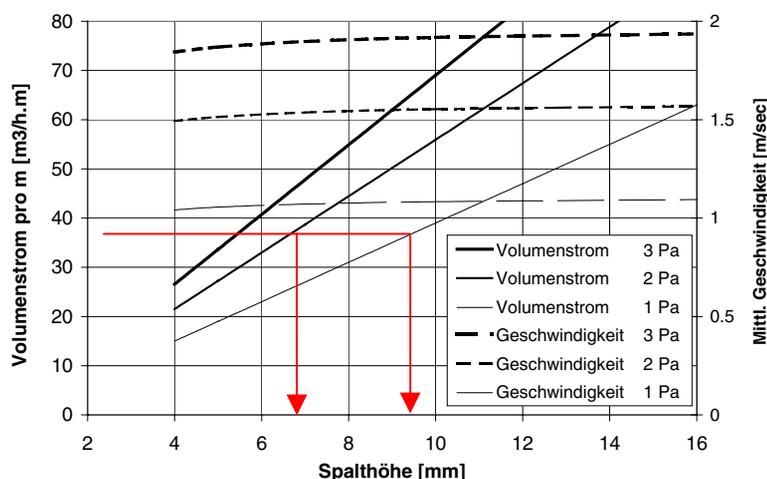
Harmonisierte europäische Auslegungsnormen sind erst in Bearbeitung.

Land	Norm, Vorschrift	Bemessungsdruckdifferenz	Bemerkungen
Belgien	NBN D 50-001	2 Pa	Produkte Renson
Deutschland	DIN 1946-6: 1998	4 Pa resp. 8 Pa 10 Pa	siehe Tabelle 3-2 Produkte Siegenia
Frankreich	E 51-732	20 Pa 10 Pa	Produkte France-Air Produkte Aereco
England			Anforderungen an Öffnungsfläche
Holland	NEN 1087: 1993	1 Pa (qv 1)	Gilt für natürliche Lüftung

Tabelle 3-3: Nominal-Druckdifferenzen für ALD von verschiedenen Normen resp. Herstellerunterlagen

Bemessung von Überströmöffnungen

Um die Zuluftzufuhr zu den einzelnen Räumen möglichst unabhängig davon zu machen, ob die Innentüren geöffnet oder geschlossen sind, sind Überströmöffnungen vorzusehen. Der Druckabfall sollte dabei zumindest in der gleichen Grössenordnung wie für die ALD, vorteilhafterweise aber tiefer sein (1-2 Pa).



Figur 3-4: Erreichbare Volumenströme und entsprechende mittleren Geschwindigkeiten in einem Türspalt von 50 mm Tiefe für Druckdifferenz von 1 bis 3 Pa [Esdorn, 1978], [Reichel, 1999]

Nimmt man z.B. die im Planer-Kit [EnergieSchweiz, 2001] postulierten 1.5 m/s als maximale Geschwindigkeit im Türspalt, ist aus Figur 3-4 ersichtlich, dass Druckdifferenzen > 2 Pa eigentlich nicht in Frage kommen. Setzt man andererseits die in der Minergie Übersicht Lüftungssysteme [Minergie-Verein, 2001] gegebenen 30 m³/h als Standardwert für die

Luftmenge pro Zimmer ein, so ergibt sich für eine 0.8 m breite Türe eine minimal erforderliche Spalthöhe von rund 7 mm (Volumenstrom pro Meter Türbreite von $30 \text{ m}^3/\text{h}$, dividiert durch 0.8 m ergibt $37.5 \text{ m}^3/(\text{hm})$)

Nach [Feist, 1999] wird aufgrund der in Kapitel 3.1. beschriebenen Systemaspekte gar eine maximale Druckdifferenz von 1 Pa gefordert. Nach der Figur 3-4 entspricht dies bei den gleichen Bedingungen wie oben (Türbreite 0.8 m, Volumenstrom $30 \text{ m}^3/\text{h}$) einer Spalthöhe von knapp 10 mm und einer Luftgeschwindigkeit von ca. 1.1 m/s im Spalt.

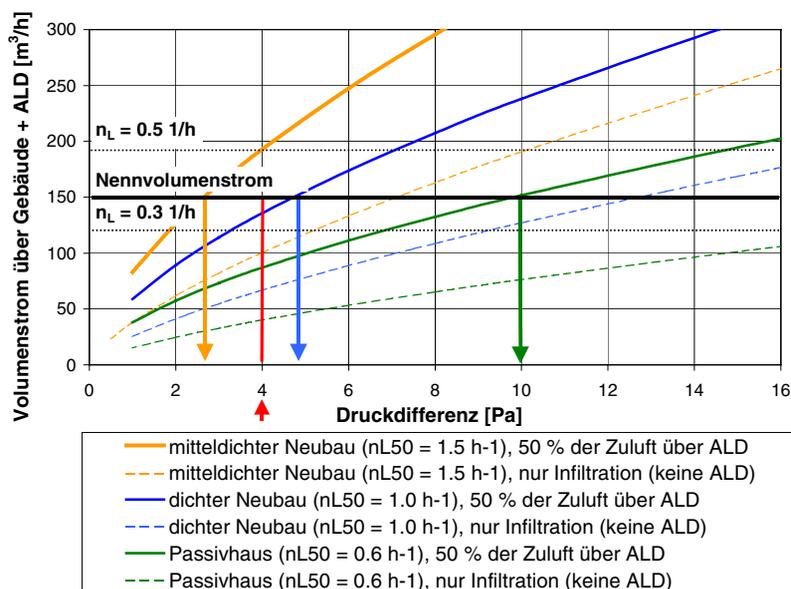
3.4. Einfluss von Gebäude und Aussenklima auf die Druck- und Strömungsverhältnisse

Im Vergleich zu den durch Rohrsystem, Filter und Wärmetauscher verursachten Druckverlusten ist der Druckabfall über dem ALD sowie der Überströmöffnung sehr gering (s. Kapitel 3.2.). Auch äussere Einflüsse wie Wind oder Thermik haben lediglich Druckunterschiede von wenigen Pascals zur Folge. Untersuchungen (s. Anhang B) haben gezeigt, dass selbst bei einem Axial-Ventilator mit verhältnismässig flacher Druckdifferenz-Volumenstrom-Charakteristik keine Veränderung des Abluftvolumenstroms infolge äusserer Einflüsse zu erwarten ist.

Für den Zuluftvolumenstrom über dem ALD spielen wegen den kleinen Druckdifferenzen auch natürlicher Kräfte eine entsprechend grosse Rolle. Andererseits werden auch bei diesen kleinen Druckdifferenzen ggf. wesentliche Anteile der Zuluft gar nicht über die ALD, sondern über Leckagen in der Gebäudehülle angesaugt. Auf diese Einflüsse wird im folgenden vertieft eingegangen.

Einfluss der Gebäudedichtigkeit

Wieviel Aussenluft wird über die ALD und wieviel über die Leckagen der Gebäudehülle zugeführt? Diese Abhängigkeiten werden mit und ohne ALD für drei Gebäude mit unterschiedlichen Luftdichtigkeiten in Figur 3-5 dargestellt.



Figur 3-5: Systemcharakteristik für unterschiedlich dichte EFH. Die ALD wurden in ihrer Grösse jeweils so gewählt, dass 50 % des Nennvolumenstroms über diese und 50 % über die Gebäudehülle einströmt

Aus Figur 3-5 ist ersichtlich, dass für einen Zuluftvolumenstrom von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ($n_L = 0.38 \text{ h}^{-1}$) für einen mitteldichten Neubau (Luftdurchlässigkeitswert: $n_{L,50} = 1.5 \text{ h}^{-1}$) bereits bei einer Druckdifferenz von ca. 2.5 Pa, 50 % der Aussenluft über die Gebäudeleckagen einströmt. Damit 80 % über die ALD einströmen, müsste das Druckniveau sogar auf 1 Pa reduziert werden. Bei 4 Pa strömen rund $\frac{2}{3}$ der Aussenluft über die Undichtigkeiten ins Gebäude.

Für ein sehr dichtes Gebäude (z.B. Luftdurchlässigkeitswert gemäss Passivhausstandard, $n_{L,50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$) können auch bei einer Druckdifferenz von 10 Pa über die Gebäudehülle noch 50 % über ALD zugeführt werden. Bei 4 Pa können 73 % der Zuluft über die ALD eingebracht werden, bei 2.5 Pa rund 80 %.

Diese Beispiele zeigen deutlich, dass der Gebäudedichtigkeit im Zusammenhang mit Abluftanlagen eine prioritäre Bedeutung zukommt.

Nur in sehr dichten Gebäuden kann ein sinnvoller Anteil des Aussenluftstromes als Zuluft durch die ALD in die Räume eingebracht werden. In allen anderen Fällen werden wesentliche Anteile der Zuluft unkontrolliert durch die Luftdurchlässigkeiten der Gebäudehülle zugeführt.

Aussenluft über die Gebäudeundichtigkeit

Warum soll die Aussenluft denn nicht über die Gebäudeundichtigkeit einströmen?

Die Abwärmenutzung ist ja nicht gefährdet, da die erwärmte Raumluft abgesogen wird. Es sind aber trotzdem viele Nachteile in Kauf zu nehmen, die eine Zuluftzufuhr über ALD erforderlich machen:

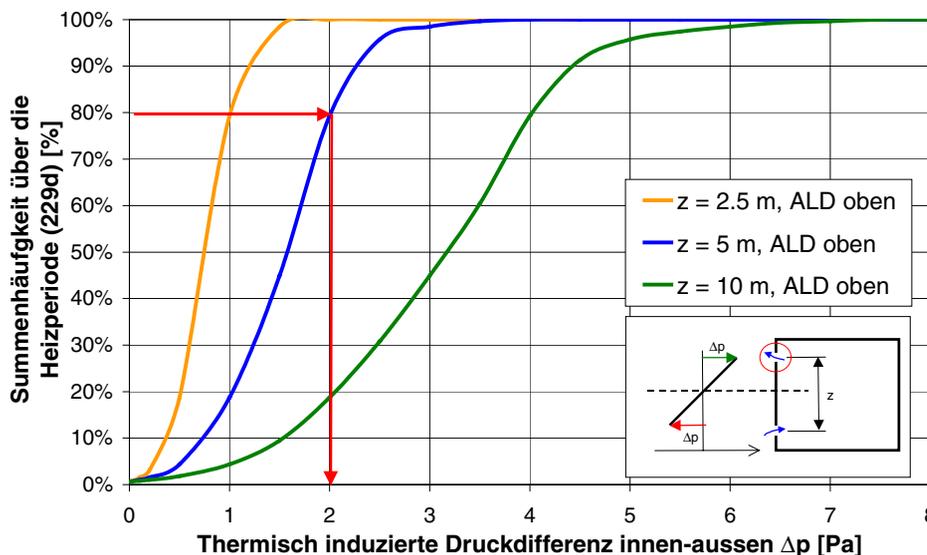
- Die Aussenluftzufuhr und die Lüftungseffizienz in den einzelnen Räumen ist nicht gewährleistet, da die Leckagen und somit die Strömungspfade unbekannt sind.
- Das Zugluftisiko ist nicht unter Kontrolle, da Luftvolumenstrom und Leckagenanordnung unbekannt sind. Nur bei gleichmässig verteilten Undichtigkeiten könnte ggf. erwartet werden, dass weniger Zugluftprobleme als bei einem ALD auftreten.
- Es besteht keine gezielte Möglichkeit der Luftfilterung
- Es ist keine gezielte Schalldämmung möglich

Einfluss von Aussentemperatur, Wind und Gebäudehöhe

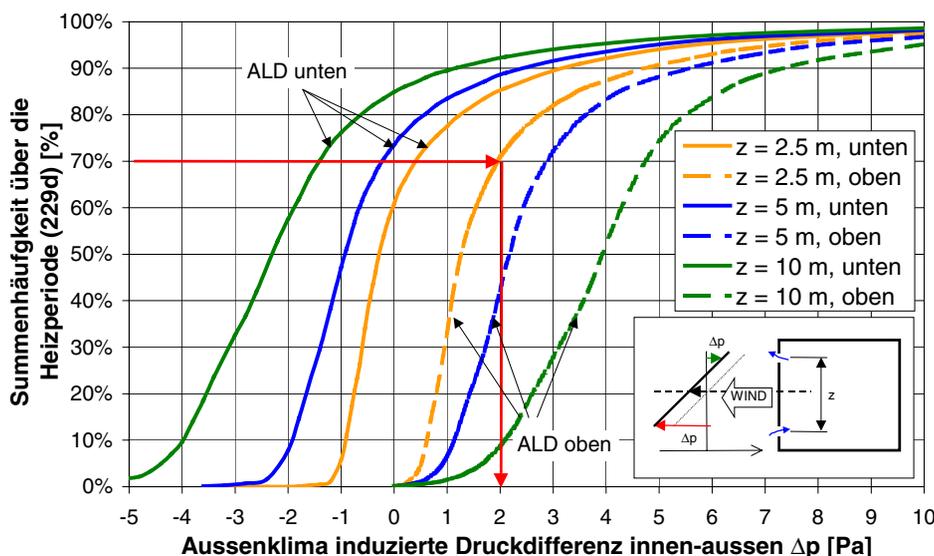
Durch die klimatischen Randbedingungen werden im Abluftsystem die Druckverhältnisse vor allem beim ALD beeinflusst, einerseits durch die Kaminwirkung (stack effect) infolge Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen, andererseits durch die windinduzierten Drücke an der Gebäudefassade.

Die zeitlich dominierenden thermisch induzierten Drücke bewegen sich in den Grössenordnungen der Auslegungsdruckdifferenz der ALD. Entsprechend gross ist deshalb die Beeinflussung der über die ALD einströmenden Luftstraten.

Aus Figur 3-6 ist so z.B. ersichtlich, dass für eine wirksame Höhendifferenz, die sich über mehr als eine Stockwerkhöhe erstreckt ($z = 5$ m), der thermisch induzierte Druck z.B. in 80% der Zeit unter 2 Pa liegt (an der oberen Öffnung als Überdruck, an der unteren als Unterdruck).



Figur 3-6: Summenhäufigkeiten der thermisch induzierten Druckdifferenz über den oberen ALD für den Standort Zürich während der Heizperiode (Heizgrenze 12 °C)



Figur 3-7 : Summenhäufigkeiten der klimateinduzierten Druckdifferenz (Kamineffekt und Wind) über die ALD unten und oben (Höhenunterschiede 2.5, 5 und 10 m) auf der Leeseite der Fassade während der Heizperiode (Heizgrenze 12°C) für den Standort Zürich.

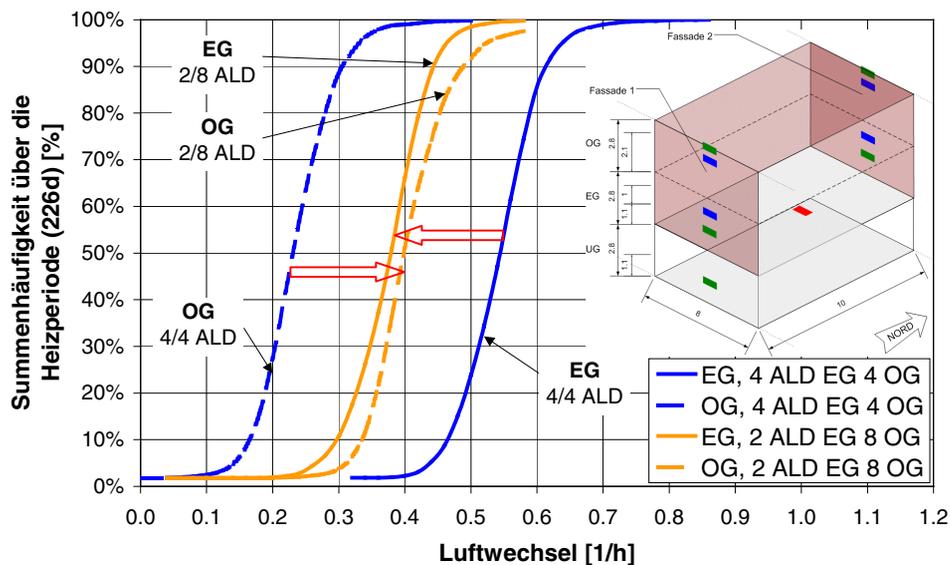
In der Figur 3-7 ist der thermische sowie der vom Wind induzierte Druck zusammengefasst dargestellt. Da die Überdrucksituation ($p_{\text{innen}} > p_{\text{aussern}}$) besonders problematisch ist, weil dort das Abluftsystem den natürlichen Kräften entgegenwirken muss, wird eine windabgewandte Fassade betrachtet. Aus Figur 3-7 ist so z.B. für ein Gebäude in Zürich mit einer Stockwerkshöhe von 2.5 m abzulesen, dass die Druckdifferenz über dem ALD infolge der natürlichen Kräfte während 70 % der Zeit unter 2 Pa liegt. Aus diesem Diagramm ist auch ersichtlich, dass die Druckdifferenz im Obergeschoss selbst bei einer wirksamen Höhendifferenz von 10 m während über 50 % der Zeit unter 4 Pa liegt. Die windzugewandte Fassade ist stets weniger kritisch, da dort der Winddruck für das Abluftsystem unterstützend wirkt.

Der Einfluss von Aussentemperatur und Wind sowie des Abluftsystems auf den Luftwechsel wurde anhand eines zweigeschossigen Reihen-EFH mit dem Berechnungsprogramm [COMIS 3.1, 2001] untersucht. Das Gebäudemodell mit allen Luftaustauschknoten ist in Figur 3-8 dargestellt. Bei den Wetterdaten (Aussentemperatur, Wind und Windrichtung) handelt es sich um ein DRY (Design Reference Year) von Zürich-Kloten. Um die Winddrücke auf die Fassaden zu berechnen, wurden gängige Winddruckbeiwerte (c_p -Werte) für ein freistehendes Gebäude verwendet. Die detaillierten Randbedingungen sind im Anhang B dokumentiert.

Geht man nun von einer gleichen Anzahl ALD im unteren sowie im oberen Geschoss aus, so ist aus Figur 3-8 ersichtlich, dass bei einer Auslegungsluftwechselrate n_L von 0.4 h^{-1} für die beiden Stockwerke im Mittel ein Luftwechseldifferenz Δn_L von 0.3 h^{-1} resultiert.

Da die Abluftrate, wie bereits in Kapitel 3.3. beschrieben, praktisch konstant bleibt, gilt zu beachten, dass für einen gegebenen Zeitpunkt z.B. ein hoher Luftaustausch im EG, einem tiefen im OG entspricht. Die Luftwechselraten sind im EG aber meist $> 0.4 \text{ h}^{-1}$, im OG hingegen fast immer $< 0.4 \text{ h}^{-1}$.

Für Gebäude mit einer bezüglich Kamineffekt relevanten Verbindung über mehrere Stockwerke, drängt sich also die Verwendung von ALD mit einer Volumenstrombegrenzung oder eine stockwerkbezogene Dimensionierung der ALD auf. Der Einfluss von unterschiedlich gross dimensionierten ALD (resp. unterschiedliche Anzahl ALD) ist ebenfalls der Figur 3-8 zu entnehmen. Nur mit einer grösseren Anzahl ALD im OG kann eine ausgeglichene Aussenlüftrate in EG und OG erreicht werden.



Figur 3-8: Summenhäufigkeit der resultierenden Luftwechselraten über die Heizperiode in EG und OG eines zweigeschossigen Gebäudes mit unterschiedlicher Anzahl und Aufteilung der ALD auf EG und OG, für den Standort Zürich (COMIS Berechnung)

Um die für den Kamineffekt relevante Höhendifferenz klein zu halten und somit eine noch sinnvolle Auslegung der ALD zu ermöglichen, müsste möglichst eine geschossweise Abtrennung und Dichtung erwirkt werden. Dies ist aber realistischerweise in der Praxis kaum erreichbar.

3.5. Einfluss der Selbstregelung der ALD sowie der Benutzersteuerung auf die Druck- und Strömungsverhältnisse

Durch Windböen können kurzzeitig hohe Druckdifferenzen über die Fassade auftreten. Sturmsicherungen oder Volumenstrombegrenzungen, wie sie von gewissen Herstellern angeboten werden, bieten eine wirksame Lösung um Diskomfort und Zugserscheinungen zu vermeiden. Bei Räumen mit diagonal orientierten Fassaden und mehreren ALD ist deshalb eine Rückströmsicherung sinnvoll, welche bei starkem Wind Durchzug und damit auch Energieverlust vermeiden soll. Dies gilt vor allem auch für mehrgeschossige Gebäude.

Einige ALD regulieren den Strömungsquerschnitt und somit den Volumenstrom automatisch nach Zulufttemperatur oder Raumluftfeuchte. Wie schon erläutert, ist der Abluftstrom relativ konstant, solange die Drehzahl des Ventilators nicht dem kleineren erforderlichen Volumenstrom angepasst wird. Bei unangepassten Abluftstrom steigt somit bei geschlossenen ALD einfach die Druckdifferenz über die Fassade um wenige Pascal an, und die Zuluft strömt einerseits durch die noch offenen ALD nach, andererseits aber verstärkt auch unkontrolliert über die Undichtheiten der Bauhülle. Dieser Effekt kommt natürlich umso deutlicher zum Tragen, je kleiner die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist. Damit wird bei der Feuchte- oder Temperaturregelung eine Umlagerung der Zuluftvolumenströme auf andere Räume und auf die Infiltration erreicht, ohne jedoch den Abluftstrom und somit die Lüftungsverluste zu reduzieren.

Bei einer effizienten und energiesparenden Lüftungsanlage müssten also ALD und Abluftventilator zusammen geregelt werden können, nach einem Raumluftparameter (Temperatur, Feuchte, CO₂) oder nach der Anwesenheit von Personen (bedarfsabhängige Lüftung).

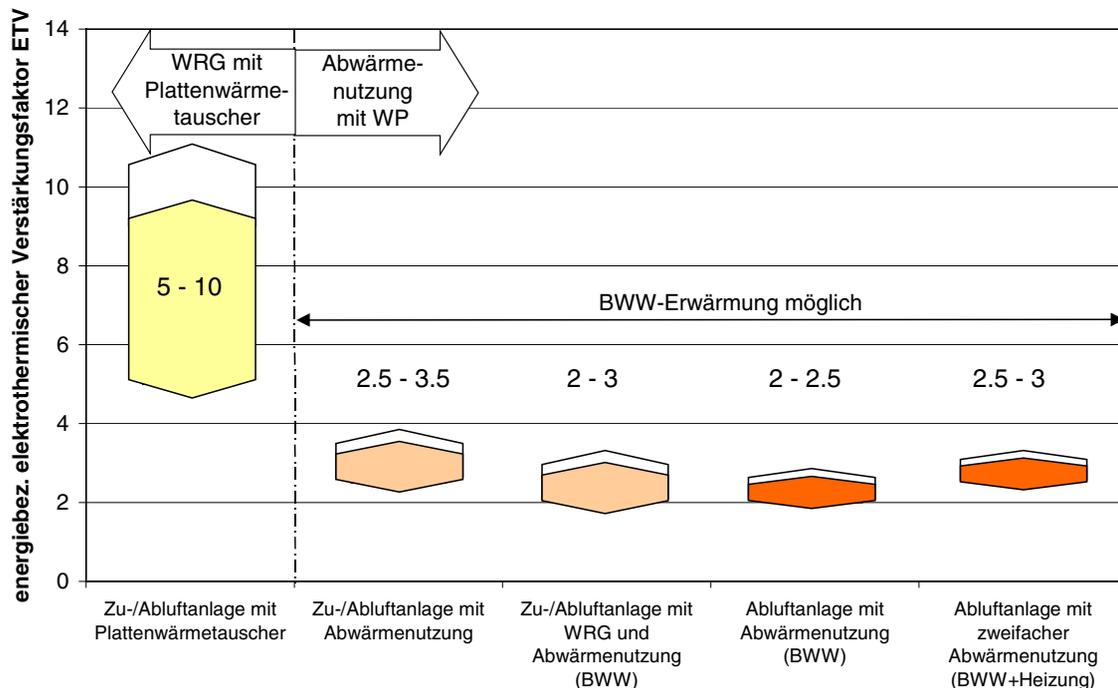
3.6. Energieeffizienz von Abluftanlagen

Die Energieeffizienz einer elektrothermischen Anlage lässt sich am anschaulichsten mit Hilfe des elektrothermischen Verstärkungsfaktors (ETV) beschreiben. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis von nutzbarer thermischer Energie zu notwendiger elektrischer Energie (3-1).

$$ETV = \frac{Q_{th}}{Q_{el}} \quad (3-1)$$

Bei der elektrischen Energie sind unbedingt auch die Verbräuche der Hilfsaggregate wie Pumpen, Ventilatoren, Regulierungen, Antriebe, etc. miteinzubeziehen. Neben dem ETV ist auch das Temperaturniveau, auf welchem die thermisch nutzbare Energie bereitgestellt wird, von Bedeutung. Ein höheres Temperaturniveau bedeutet, dass die Energie flexibler und vielseitiger eingesetzt werden kann (z.B. Brauchwarmwassererwärmung, Gebäudeheizung, etc.). Aus diesem Grund können Systeme mit einer Wärmepumpe nicht direkt mit Wärmerückgewinnungs-Systemen (z.B. Plattenwärmetauscher) verglichen werden, da die Nutzenergie mit einer anderen Wertigkeit bereitgestellt wird.

Bei einer Abluftanlage ist die Zuluft lokal getrennt von der Abluft. Darum ist es nicht möglich, die Wärme in der Abluft über eine Wärmerückgewinnung (WRG) wie bei einer Zu-/Abluftanlage zurückzugewinnen. Statt dessen wird in der Abluft die Energie mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe (WP) entzogen. Der ETV des Gesamtsystems liegt somit stets unter der jährlichen Leistungszahl der WP. Damit beträgt der jährliche ETV bei einer Abwärmenutzung mit WP je nach Nutztemperaturniveau, Ausführung und Anlagegrösse zwischen 2 bis 3. Zu-/Abluftanlagen mit WRG erreichen Werte von 5 bis 10 je nach Anlagengrösse. Beim energetischen Vergleich zweier Systeme ist jedoch unbedingt zu beachten, dass jeweils das Gesamtsystem integral beurteilt wird (d.h. mit der Brauchwarmwasseraufbereitung, etc.). Figur 3-9 zeigt eine energetische Gegenüberstellung von verschiedenen Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung oder Abwärmenutzung.



Figur 3-9: Gegenüberstellung des energiebezogenen elektrothermischen Verstärkungsfaktor (ETV) von verschiedenen Lüftungsanlagen

4. Untersuchungen an Aussenluftdurchlässen (ALD)

4.1. Aussenluftdurchlasstypen und Konfigurationen

Übersicht über untersuchte Aussenluftdurchlässe

Die experimentellen Arbeiten wurden an neun verschiedenen, kommerziell erhältlichen Aussenluftdurchlässen durchgeführt. Die Fabrikate stammen aus Skandinavien, Deutschland, Frankreich und der Schweiz. Aus Wettbewerbsgründen sind in diesem Bericht keine Produktbezeichnungen angegeben. Die nachfolgend verwendeten Kurzbezeichnungen setzen sich aus der *Einbauposition*, der *Auslassgeometrie*, und der *Luftstrahlrichtung* zusammen (z.B. F-SH-O: Einbau in Fensterrahmen/Fenster, Schlitzdurchlass horizontaler, Strahlrichtung gegen oben.)

Bezüglich der Ausblas- und Raumluchtströmungseigenschaften kann zwischen Freistrah und Wandstrahl unterschieden werden, wobei es häufig zu einer Kombination beider Strömungstypen kommt. Um die strömungstechnischen Eigenschaften der ALD auf der Raumseite zu verdeutlichen zeigt die Tabelle 4-1 den schematischen Seiten- und Aufriss jedes Elements sowie deren Abmessungen.

Die meisten Aussenluftdurchlässe sind einfach in der Konstruktion und erfordern keinerlei Hilfsenergie. Eine Ausnahme bildet der Typ W-A-Q, welcher als einziger der untersuchten Durchlässe die einströmende Aussenluft über einen Luft-Wasser Wärmeaustauscher erwärmen oder kühlen kann.

Einige Aussenluftdurchlässe sind mit Volumenstrombegrenzung und/oder Luftfilter in verschiedenen Filterklassen erhältlich. Teilweise sorgen akustische Massnahmen für eine erhöhte Schalldämmung. Eine Übersicht über die Eigenschaften (Herstellerangaben) und Merkmale der untersuchten Aussenluftdurchlässe ist ebenfalls der Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Experimentelle und rechnerische Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen können in folgende Gebiete unterteilt werden:

- Messungen der Volumenstrom-Kennlinie (Kapitel 4.2.)
- Messungen und Visualisierungen der Raumluchtströmung (Kapitel 4.3.)
- Rechnerische Untersuchungen der Raumluchtströmung mit CFD (Kapitel 4.3.)
- Schlagregenprüfung (Kapitel 4.4.)
- Akustik-Messungen (Kapitel 4.5.)

Die Tabelle A 1-2 im Anhang zeigt, welche Untersuchungen für welche Konfigurationen durchgeführt wurden und welche Resultate im Detail vorliegen.

Bezeichnung		F-SH-O	W-A-Q	W-A-H	W-R-OS	W-R-SOU	F-SH-OU	F-SH-H	W-R-R	F-A-O
Schematische Darstellung der Luftführung: Seitenansicht										
Schematische Darstellung der Luftführung: Aufriss										
Geometrische Abmessungen in mm	Länge Breite Tiefe Durchmesser	340 31 50 -	644 300 150 -	360 75 360 -	- - 100 300-500	- - 100 300-500	370 16 50 -	370 16 50 -	- - 100 200-380	600 80 76 -
Typische Einbauposition	Fensterrahmen oben/unten Wand oder Brüstung	F W	W	W	W	W	F	F	W	F
Geometrie Durchbruch Fenster/Wand	Schlitz horizontal Rechteckfläche Rund	SH A R	A	A	R	R	SH	SH	R	A
Strahlrichtung Auslass	Horizontal gegen Raum Gegen oben Gegen unten Seitlich Radial Quellluftartig	H O U S R Q	O	H	O S	Q	O U	H	R	O
Durchflussregelung	Starre Einrichtung Handregulierung Volumenstromgeregelt Feuchtegeregelt Druckgeregelt Thermostatisch geregelt Absperrbar	S H VR FR DR TH A	DR**)	VR*) H	H (DR***)	(H) FR (DR***)	H	H	(H) TH	H
Filter	Vorhanden Nicht vorhanden	J N	N	J	J	J	J*)	J*)	J	N
Schalldämmung	Vorhanden Nicht vorhanden	J N	N	J	J	J*)	J	N	N	J*)
Schalldämm-Mass, bei offenem Aus- senluftdurchlass (Herstellerangaben)	$D_{n,e,w}$ [dB] bez. auf $A_0=10 \text{ m}^2$ A_0 : Bezugsabsorptionsfläche Baulänge Wandeinbau 0,3 m (SD =Schalldämpfer)	31	38	keine Angaben	o./m.SD 31/47	45	k. Angaben	k. Angaben	m. SD 37-42	je nach Ausf. 28-47
Nachheizregister	Vorhanden Nicht vorhanden	J N	N	J	N	N	N	N	N	N
Druckverlust- Volumenstrom Charakteristik (Herstellerangaben)	Volumenstrom [m ³ /h] bei 2 Pa 4 Pa 6 Pa 8 Pa 10 Pa 20 Pa Druckexponent n Luftdurchlässigk. D [m ³ /(hPa ⁿ)]	 21 23 32 0.45 8.13	(F5) 31 37 44 49 0.51 15.06	(G3) 12 14 16 25 0.59 4.18	(G2/G3) 19/11 28/17 29/50 0.55/0.57 9.17/5.16	16 29 43 0.63 6.62	o. Filter 14 21 29 0.48 6.76	o. Filter 19 25 36 0.47 8.65	m./o. F. 9/20 11/24 13/27 14/30 21/42 0.50/0.46 4.62/10.4	36 dB Ausf. 26 38 0.56 7.24
Schlagregenprüfung	Prüfergebnis und Prüfnorm:	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	k. Angaben	Gruppe C (DIN 18055)
Wärmebrücken-Effekt	Wärmedurchgang U [W/m ² K]	Kunststof f	innen- liegend	keine Angaben	Kunststof f	Kunststof f	Kunststof f	Kunststof f	Kunststof f	1.9
Für welches Lüf- tungssystem be- sonders geeignet?	Abluftsystem mit WRG Natürliche Querlüftung Natürliche Schachtlüftung	J N N	J N N	J N N	J N N	J N N	J N N	J N N	J N N	J J J

*) Optional erhältlich

**) Ab einer bestimmten Druckdifferenz konst. Volumenstrom

Tabelle 4-1: Produkteübersicht der untersuchten Aussenluftdurchlässe (Herstellerangaben)

4.2. Volumenstrom-Kennlinien

Theoretische Grundlagen

Um Abluftsysteme zu dimensionieren, muss die Druckverlustcharakteristik der eingesetzten ALD bekannt sein. Diese Eigenschaft wird im Wesentlichen durch die Querschnittsform, Tiefe und Kantenschärfe der Öffnung beeinflusst. Nach [Bohl, 1994] gilt folgender Zusammenhang:

$$\dot{V} = \alpha \cdot A_d \cdot \left(\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p \right)^n \quad (4-1)$$

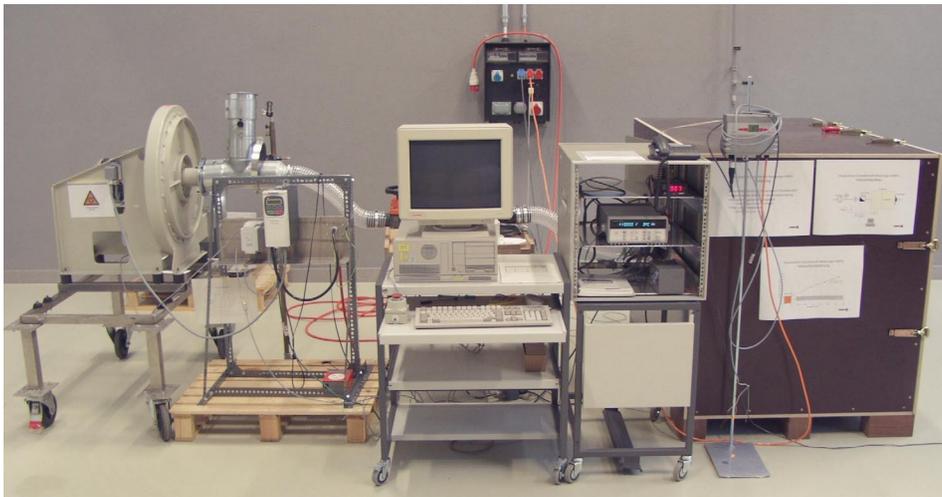
Reduziert auf zwei Parameter für eine Regressionskurve der Messpunkte ergibt sich folgende vereinfachte Schreibweise:

$$\dot{V} = D \cdot \Delta p^n \quad (4-2)$$

Der Druckexponent n beträgt bei einer vollständig turbulenten Strömung 0.5 und bei einer vollständig laminaren Strömung 1. Die „äquivalente Strömungsfläche“ wird durch Umstellen der Gleichung (4-1) berechnet, wobei die Durchflusszahl einer scharfkantigen Blende ($\alpha = 0.6$) eingesetzt wird.

Experimentelle Untersuchungen

Für die Untersuchung der strömungstechnischen Eigenschaften der Aussenluftdurchlässe wurde ein geeigneter Versuchsstand in Anlehnung an [prEN 13141-1] entwickelt. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Prüfkammer, einem saugseitig angeordneten Ventilator sowie einem Präzisions-Volumenstrommessgerät (Figur 4-1). Eine detaillierte Beschreibung zum Versuchsaufbau und alle gemessene Charakteristiken sind im Anhang Kapitel A2. zu finden.



Figur 4-1: Versuchsaufbau für die Untersuchung der strömungstechnischen Eigenschaften

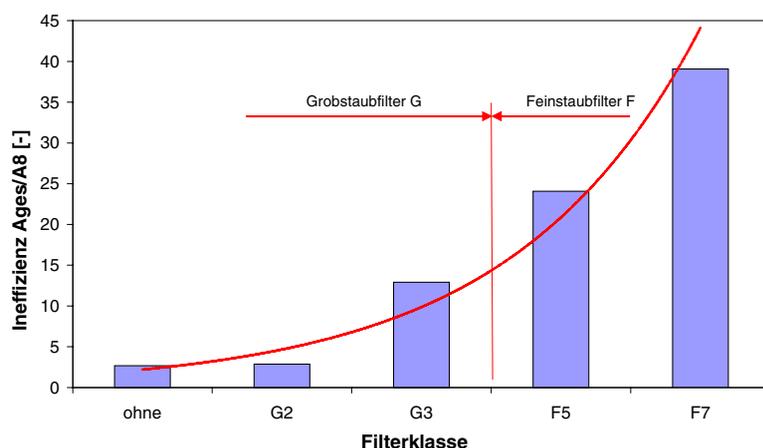
Die Tabelle 4-2 zeigt eine Zusammenstellung der druckcharakteristischen Werte gemäss Gleichung (4-2), wobei der A_8 -Wert der „äquivalenten Strömungsfläche“ bei einer Druckdifferenz von 8 Pa entspricht. Das Verhältnis der Luftdurchlassfläche A_{Ges} zur „äquivalenten Strömungsfläche“ A_8 kann als Anhaltspunkt für die geometrisch/strömungstechnische "Ineffizienz" des ALD herangezogen werden.

Kurzbez.	Situation	Ref. Nr.	n	D m ³ /h.Pa ⁿ	A ₈ cm ²	A _{ges} /A ₈ -	
F-SH-O	Messung ohne Filter, Typ 30 m ³ /h, mit Wetterschutz	1.1	0.49	6.88	23.8	4.4	
		Herstellerangabe, Ausführung 30 m ³ /h, ohne Filter	1.2	0.47	7.89	26.2	4.0
W-A-Q	Herstellerangaben, Grösse: 644x150x300 mm	2.1	0.51	15.06	54.76	19.4	
W-A-H	Messung mit Filter G3 und Schalldämpfer, offen	3.1	0.74	2.39	14.0	24.1	
		Herstellerangabe, komplett, Filter G3	3.2	0.59	4.18	17.9	18.8
W-R-OS	Messung mit Staub-/Insektenfilter G2, offen	4.1	0.55	8.49	33.1	2.2	
		Messung mit Pollenfilter G3, offen	4.2	0.81	1.85	12.4	5.9
		Herstellerangabe mit Staub-/Insektenfilter G2, offen	4.3	0.55	9.17	35.7	2.1
		Herstellerangabe mit Pollenfilter G3, offen	4.4	0.57	5.16	21.2	3.5
W-R-SOU	Messung mit Staub-/Insektenfilter G2, offen	5.1	0.51	10.83	39.4	1.9	
		Herstellerangabe mit Staub-/Insektenfilter G2, offen	5.2	0.63	6.62	30.5	2.4
F-SH-OU	Messung mit Wetterschutz, offen	6.1	0.53	5.53	20.7	1.6	
		Herstellerangaben, offen	6.2	0.48	6.76	23.1	1.4
F-SH-H	Messung mit Wetterschutz, offen	7.1	0.53	6.51	24.7	1.3	
		Herstellerangabe, offen	7.2	0.47	8.65	28.9	1.1
W-R-R	Messung mit Pollenfilter G3 und Schalldämpfer, 12 mm Spalt	8.1	0.81	0.95	6.4	13.8	
		Messung ohne Filter und Schalldämpfer, 12 mm Spalt	8.2	0.52	8.50	31.2	2.8
		Herstellerangabe mit Filter, Spaltbreite ?	8.3	0.50	4.62	16.2	5.4
		Herstellerangabe ohne Filter, Spaltbreite ?	8.4	0.46	10.42	34.2	2.6
F-A-O	Herstellerangabe, 36 dB Schallschutz, 0.6 m lang, offen	9.1	0.56	7.24	28.71	16.7	

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der druckcharakteristischen Kenngrössen

Nach unseren Experimenten hat sich gezeigt, dass der Luftwiderstand der ALD zum grössten Teil vom Luftfilter herrührt (vgl. z.B. Ref. Nr. 8.1 und 8.2 in Tabelle 4-2). Damit besteht eine Korrelation zwischen den Filterparametern (Filterklasse, Anströmgeschwindigkeit, Filterfläche, Verschmutzungsgrad) und dem Druckverlust. Die Figur 4-2 zeigt die Abhängigkeit der strömungstechnischen Ineffizienz des ALD von der jeweiligen Filterklasse. Bei den Filterklassen wird von der Klassifizierung gemäss EN 779 ausgegangen. Für Herstellerangaben, die auf ältere Normen basieren, muss jedoch von Fall zu Fall überprüft werden, welche Norm der Filterbezeichnung zugrunde liegt.

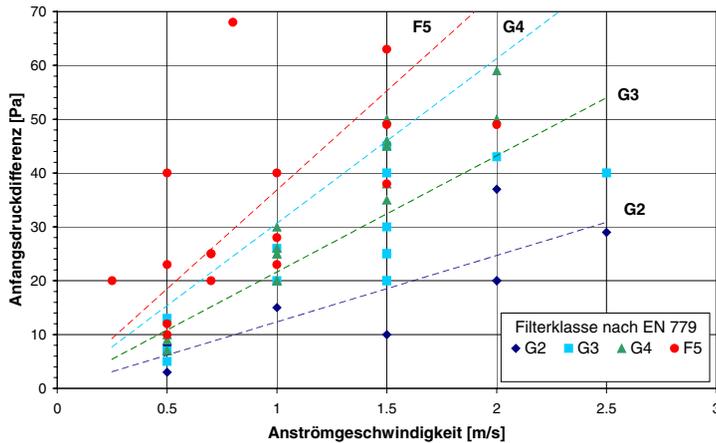
Die Angaben der Hersteller zeigen nur teilweise eine befriedigende Übereinstimmung mit den Messwerten. Oft fehlen zu den Charakteristiken in den Unterlagen wichtige Angaben wie, Öffnungsgrad (z.B. vom Luftventil), verwendete Filterklasse, Schalldämpfereinsatz, Rahmendicke, Messung ohne oder mit Wetterschutzgitter.



Figur 4-2: Strömungstechnische Ineffizienz der untersuchten ALD aufgeteilt nach der Filterklasse (Mittelwerte)

Luftfilter

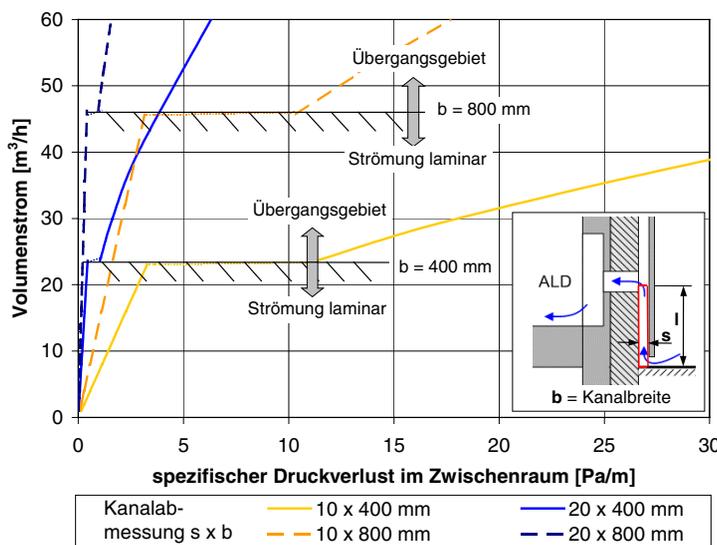
Die Schwierigkeit bei der Auswahl des Luftfilters besteht vor allem darin, bei geringer Druckdifferenz trotzdem ein für die Anwendung genügend hoher Abscheidungsgrad (hohe Filterklasse nach EN 779) zu erreichen. Die meisten ALD Hersteller verwenden Filtervliesstoffe (Filtermatten) aus Polyesterfasern welche mit mittleren Abscheidungsgraden von 65 bis 99 % erhältlich sind. Wie bereits erwähnt, ist die Charakteristik des ALD entscheidend vom Filtertyp abhängig. Die Figur 4-3 zeigt den Zusammenhang zwischen Anfangsdruckdifferenzen und Anströmgeschwindigkeiten evaluiert aus 26 verschiedenen Filtertypen, wobei für jede Filterklasse eine lineare Regression gebildet wurde. Bei der Filterwahl gilt zu beachten, dass der Abscheidungsgrad aber auch die Druckdifferenz eines Luftfilters mit steigender Verschmutzung zunimmt. Aus diesem Grund muss der Filter regelmässig, je nach Luftverschmutzung alle 4 bis 12 Monate ersetzt werden.



Figur 4-3: Anfangsdruckdifferenzen für verschiedene Filterklassen (Filtermatten) in Funktion der Anströmgeschwindigkeit

Bauseitiger Wetterschutz

Ästhetische Aspekte führen in der Praxis häufig dazu, dass bei einem ALD für den Mauereinbau die Fassade selbst als Wetterschutz dient. Bei einer solchen Konstruktion muss unbedingt der Druckverlust dieses zusätzlichen Kanals berücksichtigt werden. Dabei sind die Abmessungen (Kanaltiefe s x Kanalbreite b), welcher durch die vorgehängte Fassade entsteht, sowie der Luftvolumenstrom ein wichtiges Kriterium um den Druckverlust zu berechnen. Die Figur 4-4 zeigt den spezifischen Druckabfall (bezogen auf 1 m Kanallänge l) im Zwischenraum (inkl. Einströmung und Umlenkung) für verschiedene Kanalabmessungen in Funktion des Volumenstromes.



Figur 4-4: Spezifischer Druckverlust im Zwischenraum einer Wetterschutzfassade

4.3. Thermische Behaglichkeit (Zugluftrisiko)

Behaglichkeit und thermischer Komfort

Das Behaglichkeitsempfinden von Personen in Räumen wird durch eine Vielzahl von Wechselwirkungen mit der Umwelt beeinflusst. Dazu zählen Schall, Luftqualität, Licht und insbesondere alle Grössen, welche auf den menschlichen Wärmehaushalt einwirken (thermischer Komfort).

Die thermische Behaglichkeit ist dann erfüllt, wenn die menschliche Wärmebilanz des Körpers ausgeglichen ist. Dabei spielen folgende Faktoren eine wesentliche Rolle:

- Tätigkeit (met)
- Bekleidung (clo)
- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Temperatur der Umschliessungsflächen
- Luftgeschwindigkeit
- Turbulenzgrad der Luft

Zugluftrisiko

Unangenehme Zugscheinungen werden sehr lokal wahrgenommen. Die Vermeidung von Zugscheinungen bildet eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung für die Erfüllung des thermischen Komforts.

Als eine anerkannte Methode zur Abschätzung des zu erwartenden Zugluftrisikos gilt die empirische Gleichung nach EN ISO 7730:

$$DR = (34 - v_L) \cdot (v - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot v \cdot Tu + 3.14) \quad (4-3)$$

(DR – Draft Risk) beschreibt den Prozentsatz unzufriedener infolge Zugluft. Voraussetzung für die Gültigkeit der Beziehung ist ein nahezu neutrales thermisches Gesamtempfinden des Körpers. Als Zielwert für die Begrenzung des Zugluftrisikos wird eine maximale Unzufriedenheitsquote von 15 % empfohlen. Diese Angaben basieren auf einem konkreten Isolationswert der Bekleidung von 0.75 clo (Sommerkleidung) sowie dem Energieumsatz von 1.2 met (sitzende Tätigkeit). Da in unserem Fall die Wintersituation betrachtet wird, gilt ein Bekleidungszustand von 1.0 clo. Aus diesem Grund kann mit einer „scheinbaren“ Unzufriedenheitsrate von 20 % als Grenzwert gerechnet werden (entspricht effektiv ca. 15 % Unzufriedene). Der Wert von 20 % Unzufriedenen ist auch in den Normen [SIA 180] als Grenzwert festgehalten.

Aufenthaltsbereich

Der thermische Komfort muss prinzipiell im Aufenthaltsbereich gewährleistet werden.

Die Definition des Aufenthaltsbereiches (AB) muss von Fall zu Fall definiert werden. In den Normen sind folgende Richtgrössen festgehalten:

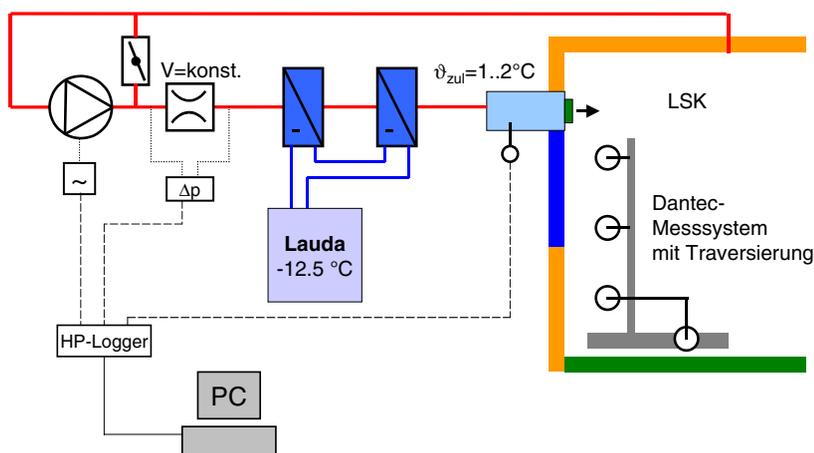
Norm	Abstand von Aussenwand mit Fenster	Abstand vom Fussboden (Untergrenze AB)
SIA V 382/1, 1992 Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen	1.0 m	0.1 m
prEN 13779, 1999 Leistungsanforderungen für raumluftechnische Anlagen	0.5 bis 1.5 m Standard 1.0 m	0.0 bis 0.2 m Standard 0.1 m
DIN 1946-6 Raumluftechnik, Lüftung von Wohnungen	0.8 m	keine Angabe

Figur 4-5: In den Normen festgehaltene Richtgrössen für den Aufenthaltsbereich

Experimentelle Untersuchungen in der EMPA Klimakammer

Der thermische Komfort in der nahen Umgebung der Aussenluftdurchlässe wurden im Raumklimalabor der Abteilung Energiesysteme/Haustechnik an der EMPA untersucht. Dabei wurden alle Innenwände so auf Temperatur gebracht, dass kein Wärmeaustausch stattfand. Die Aussenwand wurde auf eine Oberflächentemperatur von 19 °C und das Fenster auf 15 °C konditioniert. Als Wärmeabgabesystem diente entweder eine Fussbodenheizung (FBH) oder ein unter dem ALD platzierter Heizkörper (HK). Bei den Fällen mit FBH wurde der Boden (Bodenhälfte auf der Luftdurchlassseite) auf 24 °C temperiert. Die Leistungsabgabe des HK wurde in Abhängigkeit des Zuluftvolumenstroms, der Zulufttemperatur und der Wärmeverluste an den Aussenwänden gewählt.

Im schweizerischen Mittelland sind durchschnittlich etwa die folgenden Häufigkeiten der Aussenlufttemperaturen zu erwarten: Unter -10 °C während etwa 1 %, < 0 °C während etwa 16 % und < 5 °C während etwa 35 % der Zeit im Jahr. In den Versuchen wurde die Zuluft mit einer Temperatur von 1 bis 2 °C mit einem Umluftsystem über den zu untersuchenden Luftdurchlass eingeblasen. Der Einfluss von tieferen Aussentemperaturen wurde mit CFD-Rechnungen untersucht. Die Volumenströme waren jeweils so gewählt, dass über dem ALD eine Druckdifferenz von 10 Pa herrschte. Das Zugluftrisiko konnte nach Gleichung (3-4) aus den drei gemessenen Parametern Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad ermittelt werden. Die Figur 4-6 zeigt den Versuchsaufbau für die Aufbereitung der Zuluft. Oft wurde das Messfeld mit Hilfe einer automatischen Traversierung gemessen. Neben den Messungen trugen Nebelvisualisierungen und später auch CFD-Rechnungen zur Beurteilung bei.



Figur 4-6: Versuchsaufbau für Messung des thermischen Komforts und Visualisierung der Luftströmung

Zusammenfassung Messresultate

Im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass mit einer Einschränkung des Komforts nur in der Nähe der Wand (0.2 - 0.5 m) zu rechnen ist. Damit wird im Idealfall das Zugluftrisiko im Aufenthaltsbereich (je nach Definition desselben) in der Nähe der Aussenwände vernachlässigbar klein. Am Boden muss bis auf eine Höhe von 0.10 m und auf den ersten 1 bis 2 Metern Raumtiefe mit einem erhöhten Zugluftrisiko gerechnet werden.

Befindet sich unterhalb des ALD eine Wärmequelle (z.B. HK), so führt dies im Vergleich zur FBH zu einer erhöhten Luftdurchmischung in Durchlassnähe und somit zu einer Komfortverbesserung. Negativ hingegen kann sich die Umlenkung des Luftstrahls in den Raum hinein auswirken.

Hindernisse oberhalb des ALD wie z.B. Rolladenkasten, Vorhangbrett, Fenstersturz usw. können bewirken, dass der Luftstrahl direkt in den Raum umgelenkt wird, was zu erhöhtem Diskomfort in der Aufenthaltszone führt.

Gardinen können eine impulsarme und quellluftartige Strömung am Boden bewirken und führen daher tendenziell zu einer Komfortverbesserung.

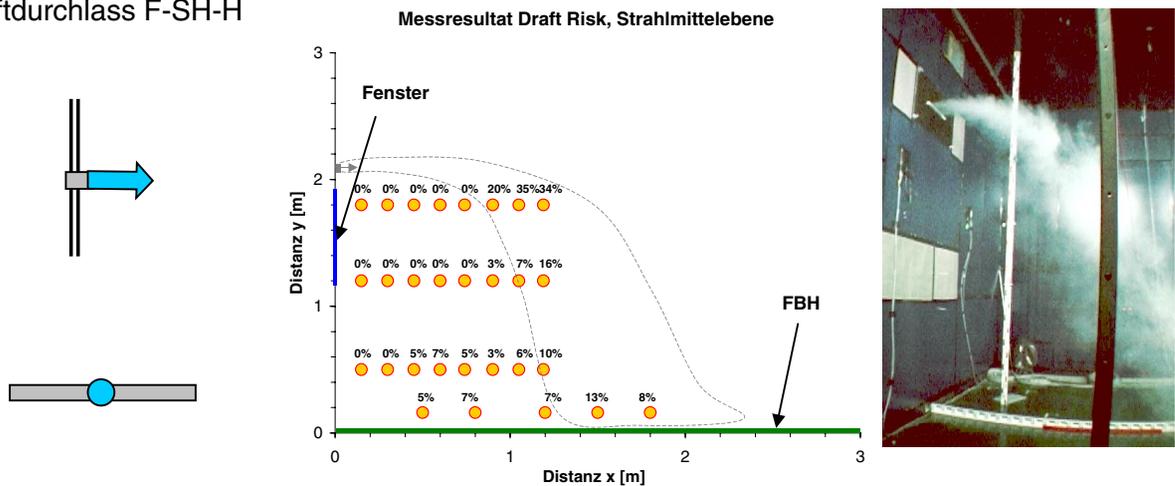
Eine ideale Luftführung mit geringem Zugluftrisiko ist dann gewährleistet, wenn der Luftstrahl mit hoher Induktion in den Raum eingeblasen wird und dabei einen möglichst langen Strömungsweg bis zur Aufenthaltszone zurücklegt (erhöhte Durchmischung).

Durchlasstyp und Geometrie

Grundlegend kann zwischen den zwei Strahltypen Freistrah und Wandstrahl unterschieden werden. Oft ist bei einem ALD eine Kombination beider Strahltypen zu beobachten.

1. **Freistrah:** Dieser Strahltyp entsteht dann, wenn die Luftdurchlassöffnung horizontal in den Raum gerichtet ist, oder der kritische Winkel (67 bis 40° je nach Austrittsgeschwindigkeit [Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik, 1989]) zwischen Luftstrahl und Wand überschritten wird. Da um den Strahl herum Raumluft induziert wird, nimmt die Strahlmittengeschwindigkeit rascher ab als beim Wandstrahl. Bei tiefen Aussentemperaturen handelt es sich um einen nichtisothermen Luftstrahl, die Strahlbahn wird somit durch die negative Archimedeszahl abgelenkt. Ein typischer Vertreter des Freistrahls ist der ALD F-SH-H. Der nach vorn gerichtete Luftstrahl führt wegen der grossen Eindringtiefe zu einer grösseren Diskomfortzone.

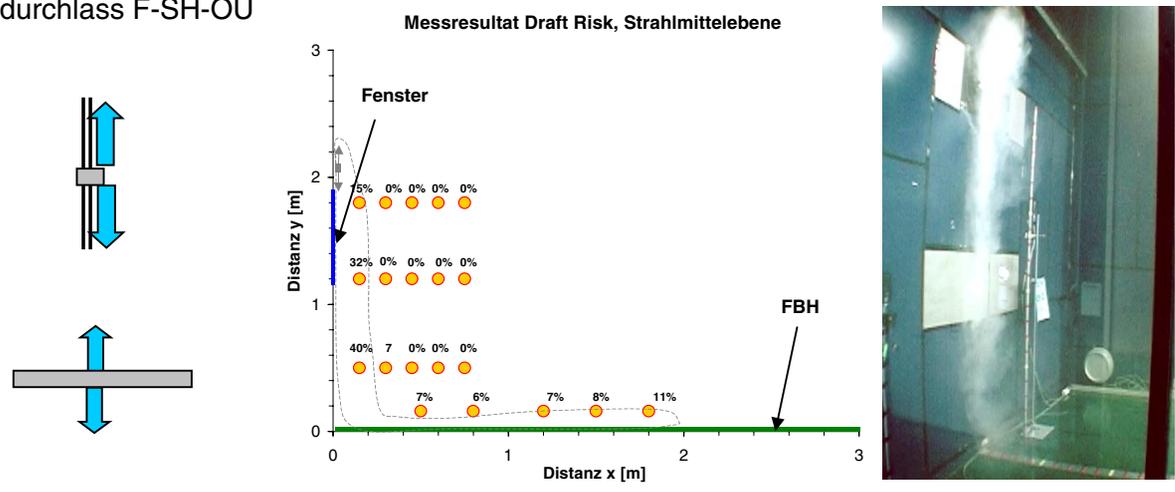
Luftdurchlass F-SH-H



Figur 4-7: Beim F-SH-H entsteht eine grosse Diskomfortzone, da dieser ALD den Luftstrahl mit hoher Austrittsgeschwindigkeit direkt in die Aufenthaltszone lenkt, Wärmequelle: FBH

2. **Wandstrahl:** Der Luftstrahl legt sich an einer ebenen Fläche an. Oft wird die Aussenluft vom ALD so umgelenkt, dass sich vertikale oder horizontale Wandstrahlen bilden (Prallplattenprinzip). Die Stabilität des Luftstrahls wird durch den Coanda-Effekt verstärkt, wobei grössere geometrische Hindernisse trotzdem eine Ablösung des Strahls von der Wand bewirken. Bekannt ist auch, dass die Strahlmittengeschwindigkeit langsamer abnimmt, als bei einem Freistrah. Der ALD F-SH-OU (Figur 4-8) zeigt ein solches Wandstrahlverhalten auf. Da der Luftstrahl sich am Rande der Aufenthaltszone vermischen kann, ist die Diskomfortzone klein.

Luftdurchlass F-SH-OU



Figur 4-8: F-SH-OU weist eine kleine Diskomfortzone auf, da der Luftstrahl nach oben und unten umgelenkt wird (Prallplattenprinzip), Wärmequelle: FBH

Inwieweit eine wandparallele Ausblausung des ALD längerfristig zu einer Wandverschmutzung führen kann, wurde nicht untersucht.

Einbauposition

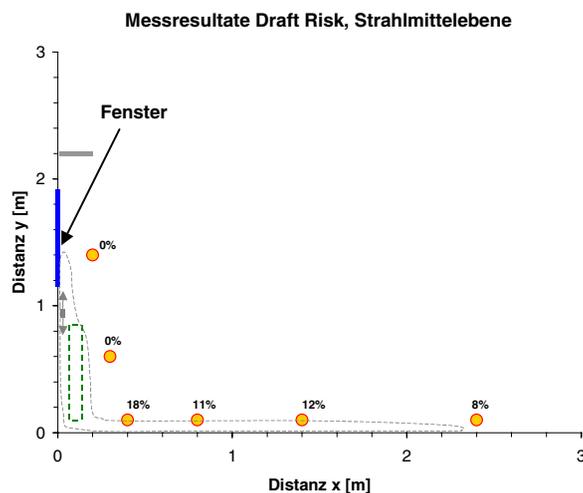
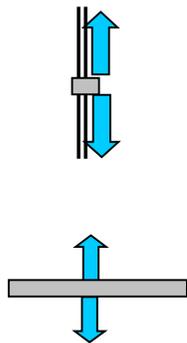
Grundsätzlich können zwei Einbaupositionen unterschieden werden.

1. **Einbau „oben“:** Der ALD ist entweder oben in einer Aussenwand oder im oberen Teil des Fensters/ Fensterrahmens eingebaut.
2. **Einbau „unten“:** Der ALD ist in der Brüstung oder im unteren Teil des Fensters/ Fensterrahmens platziert.

Die Einbauposition „unten“ zeigt bei einem ALD mit horizontalem Freistrahle bessere Komfortresultate als bei der Position „oben“. Dies darum, weil das Gebiet der Diskomfortzone im ersten Fall kleiner ist und oft weniger weit in den Raum eindringt (vgl. mit [Reichel, 1999]).

Wie unsere Messungen zeigen, gilt auch bei einem ALD nach dem Wandstrahlprinzip die Aussage, dass die Diskomfortzone bei oberer Anordnung mehr Raumtiefe in Anspruch nimmt. Auch sind die Geschwindigkeiten in Bodennähe durch die beachtliche Fallhöhe grösser. Der Komfort in Bodennähe wird jedoch gegenüber der Einbauposition „unten“ nicht schlechter, da die Stromlinien länger sind und dies somit zu einer besseren Durchmischung der Aussenluft mit der Raumluft führt (vgl. Figur 4-8 und Figur 4-9).

Luftdurchlass F-SH-OU



Figur 4-9: Die Eindringtiefe der Diskomfortzone wird bei der Anordnung „unten“ etwas kleiner, jedoch ist das Zugluftisiko entlang dem Boden etwas grösser, Wärmequelle: FBH, Heizkörper ausgeschaltet.

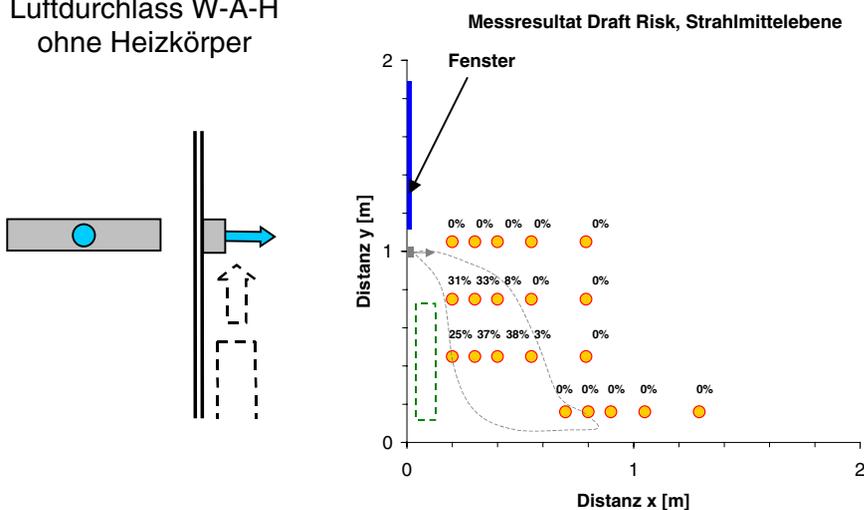
Einfluss Heizkörper

Der Einfluss von Wärmequellen unter einem ALD wurden mit Messungen an anderen Durchlasstypen sowie eine Serie von CFD-Rechnungen genauer untersucht. Die Resultate dazu sind im Anhang Kapitel A3. dokumentiert.

Ein unter dem ALD platzierter Heizkörper (HK) sorgt stets für eine stärkere Durchmischung der Zuluft mit der erwärmten Raumluft. Darum ist tendenziell mit einem verbesserten Komfort zu rechnen. Bei einer impulsreichen Strömung kann es jedoch sein, dass der Luftstrahl infolge der Wärmequelle direkt in die Aufenthaltszone umgelenkt wird. Damit wird die Eindringtiefe des Luftstrahls grösser. Andererseits wird durch die Vermischung mit warmer Raumluft das Zugluftrisiko jedoch wiederum gesenkt.

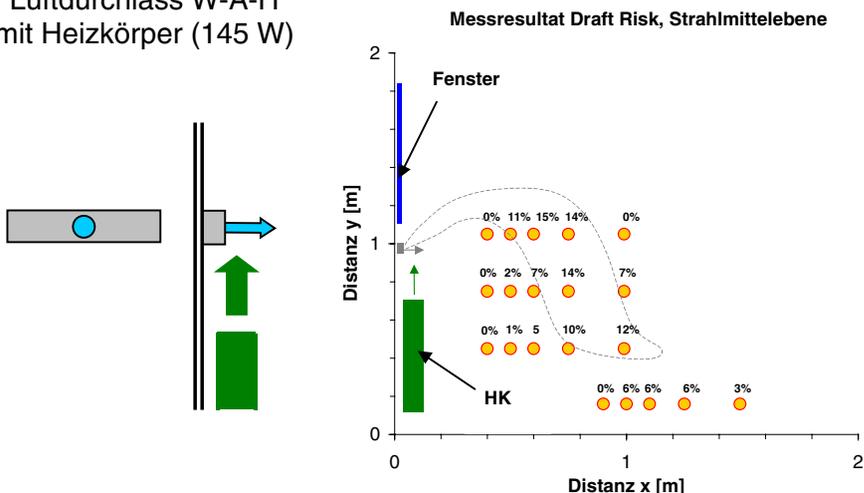
Wird die Luft impulsarm oder als Wandstrahl zugeführt, reicht meistens der konvektive Auftrieb des Heizkörpers aus, um den Luftstrahl nach oben umzulenken. Figur 4-10 und Figur 4-11 zeigen den Effekt eines Heizkörpers an dem relativ impulsreichen ALD Typ W-A-H.

Luftdurchlass W-A-H
ohne Heizkörper



Figur 4-10: Heizkörper ausgeschaltet, kleine Diskomfortzone nahe beim Durchlass

Luftdurchlass W-A-H
mit Heizkörper (145 W)



Figur 4-11: Heizkörper eingeschaltet (145 W), Strahl wird nach oben abgelenkt und stärker durchmischt. Das Zugluftrisiko wird kleiner, jedoch weiter in der Aufenthaltszone verlagert.

Einfluss Fenstersturz

Hindernisse oberhalb des Durchlasses haben vor allem dann eine Auswirkung, wenn der Luftstrahl durch die Auslassgeometrie nach oben gerichtet ist oder durch eine Wärmequelle nach oben abgelenkt wird. In diesen beiden Fällen wird die kalte Zuluft viel weiter in die Aufenthaltszone transportiert, was oft zu Diskomfort auf Kopfhöhe innerhalb der Aufenthaltszone führt (vgl. Figur 4-12 und Figur 4-13).



Figur 4-12: F-SH-O, Fussbodenheizung, Zulufttemperatur 2 °C



Figur 4-13: F-SH-O, HK ausgeschaltet, Fensterbrett, Zulufttemperatur 2 °C

Einfluss Gardinen

Mit Hilfe von Nebelvisualisierungen wurde der Einfluss von Gardinen untersucht. Ein Tagesvorhang mit feiner Struktur führt dazu, dass sich die Zuluft zwischen Wand und Vorhang anstauen kann. Dies hat zur Folge, dass die Frischluft quellluftartig zwischen Boden und Vorhangsaum austritt. Dabei ist die Zuluft über die gesamte Länge des Vorhangs verteilt und die Geschwindigkeit dementsprechend klein. Wird gleichzeitig ein Heizkörper betrieben, tritt die Luft im oberen Drittel des Vorhangs aus. Die Konstruktion des ALD hat in diesem Fall lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die Luftströmung nach dem Vorhang. Die Figur 4-14 und Figur 4-15 zeigen den Effekt der Gardinen auf die Raumluftströmung ohne und mit Heizkörper.



Figur 4-14: F-SH-O, HK ausgeschaltet und mit dünnem Tagesvorhang, Zulufttemperatur 2 °C

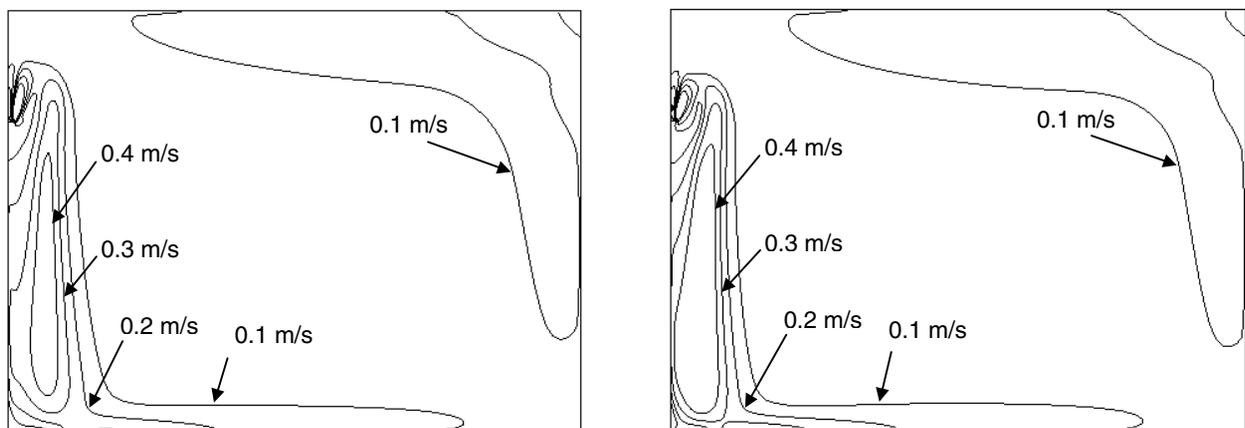


Figur 4-15: F-SH-O, HK (190 W) und mit dünnem Tagesvorhang, Zulufttemperatur 2 °C

Einfluss Aussenlufttemperatur

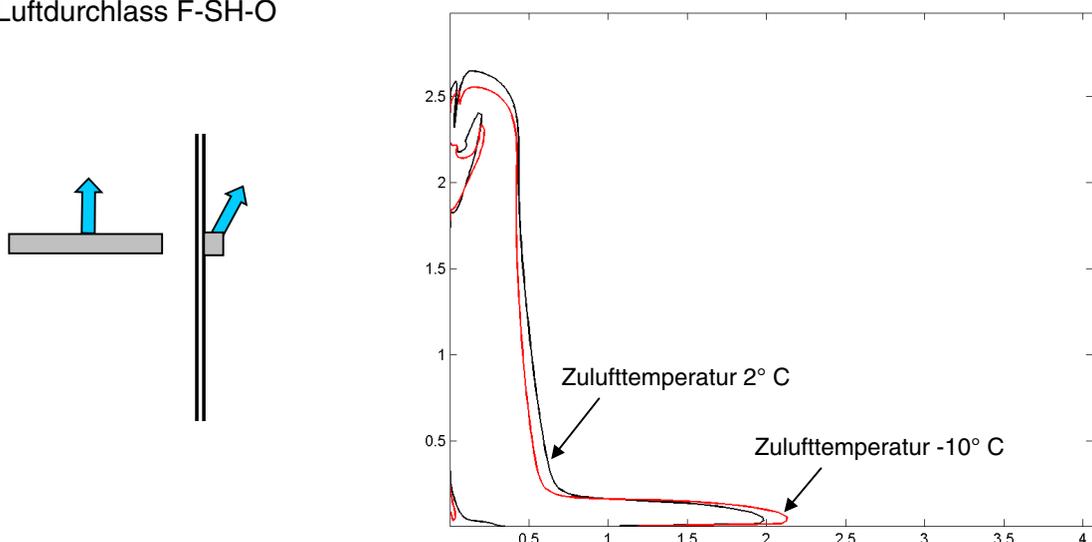
Wie erwähnt wurden aus Gründen der statistischen Relevanz, aber auch aus technischen Gründen (Einfriergefahr der Wärmeaustauscher im Zuluftkühler), die Versuche nur mit einer Zulufttemperatur von 1 bis 2 °C durchgeführt. Der Einfluss einer tieferen Aussenlufttemperatur (-10 °C) auf das Zugluftrisiko wurde mit Hilfe von CFD-Rechnungen [FLOVENT 3.1, 1999] untersucht.

Wie diese Untersuchungen zeigen, bewirkt eine tiefere Zulufttemperatur höhere Fallgeschwindigkeiten und damit eine stärkere Kontraktion des "Fallstrahls". Die resultierenden Geschwindigkeiten in der Strahlmittelebene im Raum, welche einen wichtigen Einfluss auf das Zugluftrisiko haben sind in der Figur 4-16 dargestellt. Figur 4-17 zeigt die Zugluftrisikogrenzkurve von 20% für die beiden Zulufttemperaturen. Bei tieferer Zulufttemperatur wird die Eindringtiefe bei der Fallzone (auf der mittleren Höhe) etwas herabgesetzt. Die höheren Fallgeschwindigkeiten bewirken aber eine Vergrößerung der Luftgeschwindigkeiten in Bodennähe. Somit wird die Eindringtiefe am Boden bis zu 15 cm grösser. Allgemein sind die Unterschiede infolge der tieferen Zulufttemperatur als gering einzustufen. Der eher bescheidene Einfluss rührt vermutlich daher, dass bei einer Zulufttemperatur von 2 °C der Dichteunterschied bereits einen dominierenden Einfluss auf die Raumluftrömung hat.



Figur 4-16: Vergleich der Luftgeschwindigkeiten in der Symmetrieachse bei einer Zulufttemperatur von 2°C (links) gegenüber einer Zulufttemperatur von -10 °C (rechts).

Luftdurchlass F-SH-O

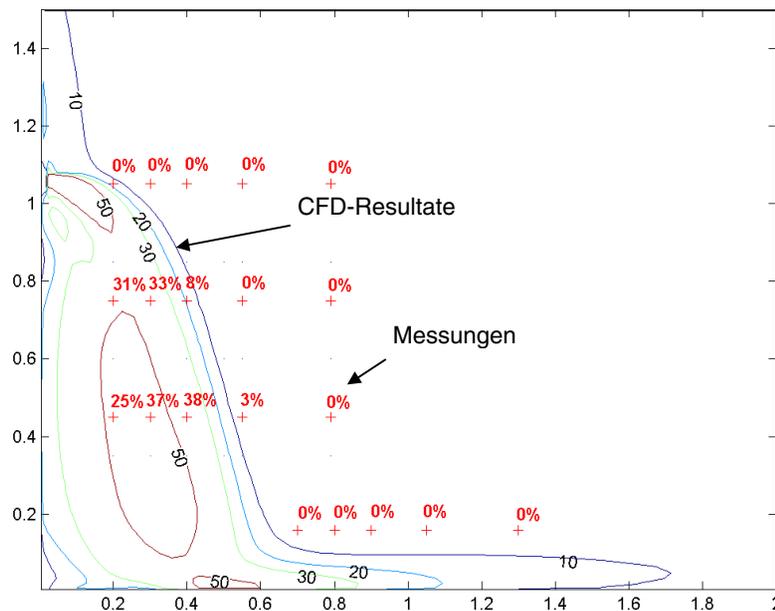


Figur 4-17: Vergleich der 20%-Isolinie für das Zugluftrisiko in der Symmetrieachse bei einer Zulufttemperatur von 2°C (schwarz) gegenüber einer Zulufttemperatur von -10 °C (rot bzw. grau) mit FBH (CFD-Rechnung)

Vergleich der Messungen mit CFD-Rechnungen

Wie bereits erwähnt, wurden parallel zu den Messungen auch für drei Aussenluftdurchlass-Typen CFD-Rechnungen mit [FLOVENT 3.1, 1999] durchgeführt. Da die Durchlassgeometrie und die Zellengenerierung gewisse Berechnungsunsicherheiten bewirken, wurden in der ersten Phase zwecks Validierung Berechnungsergebnisse und die entsprechenden Messergebnisse verglichen. Dabei galten für die Berechnungen die gleichen Randbedingungen (Zuluftvolumenstrom, Zulufttemperatur, Geometrie, Oberflächentemperaturen, usw.) wie für den Versuch. Im CFD Modell wurde dabei die Durchlassgeometrie (z.B. Strahlwinkel) solange angepasst, bis eine gute Übereinstimmung mit den Messungen vorlag.

Mit diesem "validierten" Modell wurden dann in der zweiten Phase Parameterstudien bezüglich Zulufttemperatur und Wärmequelle durchgeführt. Aus den Berechnungsergebnissen wurde stets das Zugluftrisiko berechnet und in Form von Isolinien dargestellt. Figur 4-18 zeigt anhand es ALD Typ W-A-H den Vergleich zwischen der gemessenen und der mit CFD berechneten Draft Risk (DR).



Figur 4-18: Vergleich von Draft Risk (DR): CFD-Rechnung und Messung. ALD Typ W-A-H, Fussbodenheizung, Einbauposition unten, Zulufttemperatur 2 °C, (in der Strahlmittelebene)

Vergleich der Messungen mit analytischen Ansätzen und Kennwerten aus der Literatur

Für den ALD Typ F-SH-H wurden die Messresultate mit aus den Grundgleichungen für den ebenen nicht-isothermen Freistrahlgemäss [Recknagel, 2001, Tafel 3.3.5-4] ermittelten Werten verglichen. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung für den Bahnverlauf des Freistrahls.

Für die Analyse der Strömungsverhältnisse entlang dem Boden wurden zudem CFD-Resultate von verschiedenen ALD Typen mit den von Heiselberg definierten und für Fenster- und Quellaftung ermittelten Kennwerten verglichen [Heiselberg, 2001]. Auch für die untersuchten ALD gilt, dass die Geschwindigkeit umgekehrt proportional zum Abstand von der Aussenwand abnimmt. Das Verhältnis der Geschwindigkeit im Durchlass zu den Geschwindigkeiten entlang dem Boden ist für die untersuchten Durchlässe ähnlich wie die von Heiselberg bestimmten Werte für Fensterlüftung aber höher als die entsprechenden Werte für Quellaftungsdurchlässe.

Aus den Untersuchungen und Vergleichen kann abgeleitet werden, dass die Geschwindigkeit entlang dem Boden ganz grob in etwa wie folgt von Volumenstrom, Temperaturdifferenz und Wandabstand abhängt:

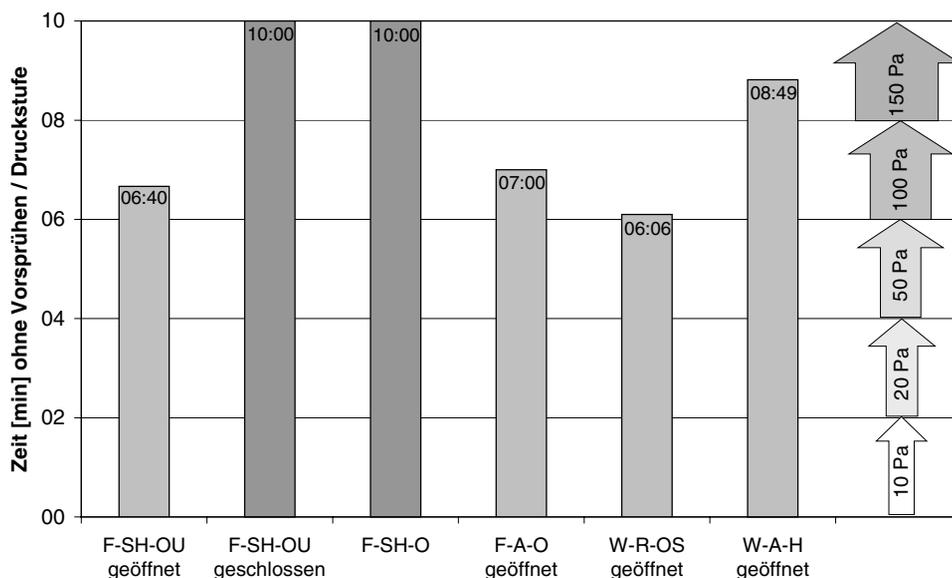
$$v_x \approx \dot{V}_0^{0.2} \cdot \Delta T^{0.4} \cdot \frac{1}{x + x_0} \quad (4-4)$$

Die Theorie und die numerischen Vergleiche sind im Anhang Kapitel A 3.3. dokumentiert.

4.4. Schlagregendichtheit

Um zu prüfen, ob die untersuchten ALD auch bei starkem Regen (z.B. Sommergewitter) wasserdicht bleiben, wurde an fünf Elementen eine Schlagregenprüfung durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine Standardprüfung nach EN 1027, welche eigentlich für das Prüfen von Fenstern eingesetzt wird. Die Leistungsprüfung für Aussenluftdurchlässe bezüglich Schlagregen wird im Normentwurf prEN 13141-1 beschrieben. Durchgeführt wurden die Prüfungen am Fenster-Schlagregenprüfstand der EMPA Dübendorf.

Während den ersten 15 Minuten wurden das Element lediglich besprüht. Nach dieser Zeit erhöhte man die Druckdifferenz stufenweise von 10 Pa über 20, 50, 100 bis 150 Pa in 2 Minuten-Schritten. Die Zeit sowie die Druckdifferenz, bei welcher ein Wassereintritt entstand, wurde festgehalten (Figur 4-19).



Figur 4-19: Schlagregendichtheit der untersuchten Aussenluftdurchlässe, Zeit (ohne Vorsprühen) bis Wassereintritt, und die entsprechenden Druckstufen

Keiner der untersuchten ALD wurde bei einem Druck von unter 100 Pa undicht, drei der fünf geprüften ALD wurden allerdings bereits einige Sekunden nach dem Erreichen dieser Druckdifferenz undicht. Bei zwei Messungen wurde die Prüfung vollständig durchgeführt, ohne dass Wasser in den Trockenbereich gelangte. Der eine ALD (F-SH-OU) war geschlossen und liess darum praktisch keine Luft eindringen, der andere ALD (F-SH-O) war mit einer mechanischen Klappe ausgerüstet, welche automatisch den Volumenstrom auf ein Maximum von 35 m³/h begrenzt. Daraus kann geschlossen werden, dass der geringere Luftvolumenstrom in diesen beiden Fällen weniger Wassertropfen (Aerosole) mitreisst als bei den anderen Messungen. Eine Sturmsicherung hat demnach indirekt auch einen positiven Effekt auf die Schlagregendichtheit.

Die Undichtigkeiten traten am Innenteil oder an den Übergängen der Teleskop-Kanäle resp. Rohre auf. Es wird darum empfohlen, zusammengesetzte ALD beim Einbau wasserfest zu verkleben, und den Verbindungskanal resp. Verbindungsrohr mit etwas Gefälle gegen aussen zu verlegen.

Neben den bereits angesprochenen Punkten ist auch der Wetterschutz ein wichtiges Element bezüglich der Schlagregendichtheit. Einige auf dem Markt angebotene ALD verfügen über Tropfnasen mit fein unterteilten Schlitz an der Unterseite, welche gleichzeitig die Funktion eines Insektengitters übernehmen. Bei unseren Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass diese engen Zwischenräume eine wasserabscheidende Wirkung auf den Sprühnebel haben. Dabei wird das abgeschiedene Wasser durch die hohen Luftgeschwindigkeiten in den ALD gepresst. Aus diesem Grund sollte ein optimaler Wetterschutz nicht über zu enge Zwischenräume verfügen (Zwischenraum > ca. 4-5 mm).

4.5. Luftschallakustische Untersuchungen

Für die Beurteilung des Schallschutzes ist es zwingend notwendig, die Schalldämmeigenschaften des ALD zu kennen. Dabei kann entweder das bewertete Schalldämmmass R_w oder die bewertete Element-Normschallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ [EN ISO 717-1] angegeben werden. Die bewertete Normschallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ ändert sich mit der Fläche eines Elementes, d.h. werden zwei gleiche ALD in einer Wand eingesetzt, wird $D_{n,e,w}$ um 3 dB niedriger. Das Schalldämmmass hingegen ist von der ALD-Fläche unabhängig.

In der Praxis wird oft die Element-Normschallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ angegeben, da diese einen besseren Vergleich der ALD untereinander ermöglicht. Einige Hersteller rechnen nach VDI 2719 die Schallpegeldifferenz auf ein fensterflächenbezogenes Schalldämmmass $R_{w(1.9)}$ um. Dieses kann mit den in der VDI 2719 festgelegten Schallschutzklassen von Fenstern verglichen und eingestuft werden.

Für die akustische Beurteilung der gesamten Fassade ist jedoch das Schalldämmmass sowie die ALD-Fläche von Bedeutung. Alle Einzahl-Angaben können nach den Gleichungen (4-5) und (4-6) umgerechnet werden. Die Bezugs-Absorptionsfläche A_0 beträgt nach Norm 10 m^2 .

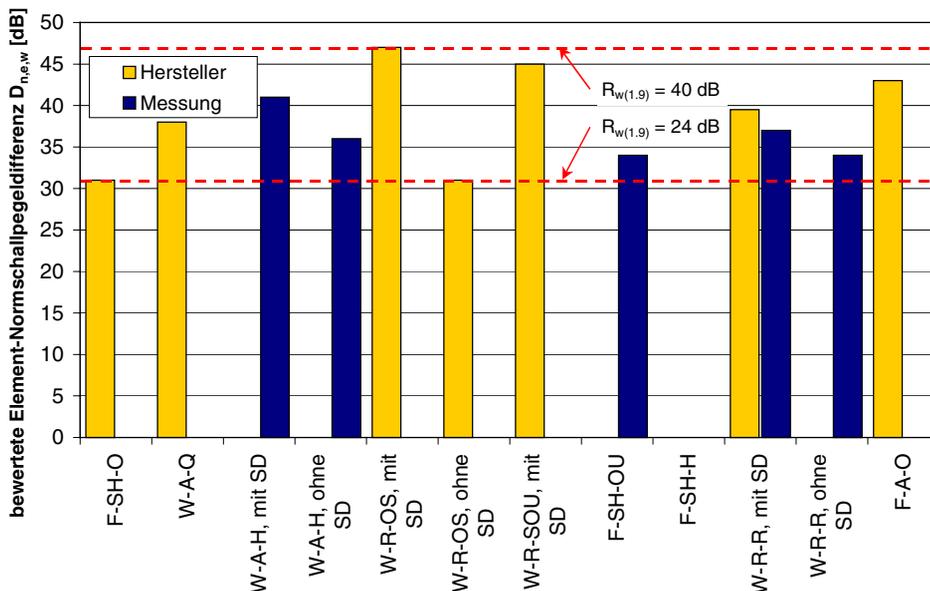
$$R_w = D_{n,e,w} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A_0}\right) \quad (4-5)$$

$$R_w = R_{w(1.9)} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{1.9 \text{ m}^2}\right) \quad (4-6)$$

Um die verschiedenen Geräuschquellen (z.B. Schienenverkehr, Autobahn, urbaner Strassenverkehr, usw.) besser zu charakterisieren, werden nach EN 717-1 die Spektrumsanpassungswerte C (rosa Rauschen) und C_{tr} (Verkehrsgerausche) berechnet und je nach Einsatzort der ALD mitberücksichtigt.

Im Rahmen einer luftschallakustischen Prüfung wurden an der Abteilung Akustik der EMPA Dübendorf die Schalldämmeigenschaften von drei verschiedenartigen ALD im geöffneten Zustand untersucht (W-A-H, F-SH-OU und W-R-R). Lediglich ein ALD konnte mit den Angaben vom Hersteller überprüft werden, da für die anderen beiden keine Angaben vorlagen.

Wie die Figur 4-20 zeigt, liegen die vom Hersteller deklarierten bewerteten Schallpegeldifferenzen $D_{n,e,w}$ der im Projekt untersuchten ALD im Bereich von 31 bis 47 dB. Die gemessenen Werte lagen je nach ALD zwischen 34 und 41 dB. Für die Praxis wird empfohlen, detaillierte und unabhängige Prüfberichte direkt beim Hersteller anzufordern. Durch Umrechnen mit der Gleichung (4-6) ergeben sich für das auf eine Fläche von 1.9 m^2 bezogene Schalldämmmass $R_{w(1.9)}$ Werte von 24 bis 40 dB.



Figur 4-20: Vom Hersteller angegebene sowie gemessene bewertete Element-Normschallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ von verschiedenen ALD

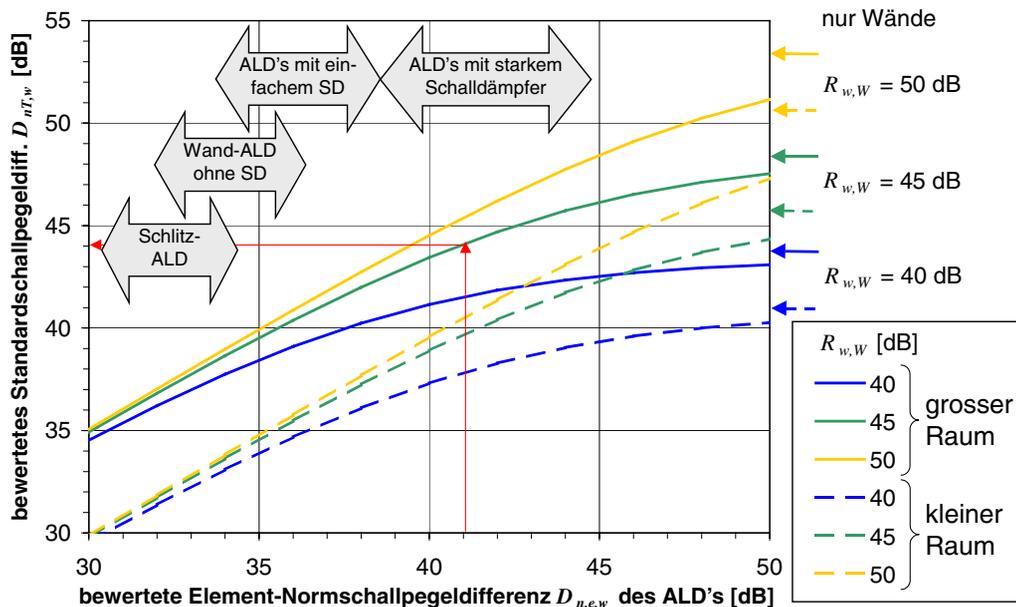
Wie die Messungen gezeigt haben, ist das Schalldämmmass R_w (bezogen auf die ALD-Fläche) von Schlitzlüftern praktisch Null. Trotzdem wirkt sich dies auf die Schallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ nicht sehr gravierend aus, da die Fläche dieser ALD-Typen meist klein ist.

Für die luftschallakustische Beurteilung der Fassade (bestehend aus Wand und ALD) nach SIA 181 muss die Standardschallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ zwischen innen und aussen nach der Gleichung (4-7) berechnet werden. Je nach Grad der Störung durch Aussenlärm müssen für Wohnungsbauten die Werte von 30, 35, 40 oder 45 dB erreicht resp. überschritten werden.

$$D_{nT,w} = R_{w,W} - 10 \cdot \log \left(\frac{T_0}{V \cdot 0.163} \cdot \left\{ S_{tot} + S_{ALD} \cdot \left(10^{0.1 \cdot \{R_{w,W} - R_{w,ALD}\}} \right) \right\} \right) \quad (4-7)$$

Wird die Gleichung (4-5) in (4-7) eingesetzt, kann die Standardschallpegeldifferenz direkt in Funktion der Element-Normschallpegeldifferenz dargestellt werden, ohne die ALD-Fläche zu kennen. Figur 4-21 zeigt diesen Zusammenhang für zwei verschieden grosse Räume mit jeweils drei unterschiedlichen Wand-Schalldämmmassen. Wie das Diagramm zeigt, ist ein grosser Raum weniger problematisch als ein kleiner.

Wird nun als Beispiel ein ALD vom Typ W-A-H mit Schalldämpfer ($D_{n,e,w} = 41$ dB) in einem grossen Raum (100 m^3) mit einem resultierenden Schalldämmmass der Aussenwand von 45 dB eingesetzt, kann aus dem Diagramm eine bewertete Standardschallpegeldifferenz von 44 dB entnommen werden. Damit wird die Mindestanforderung nach SIA 181 für den starken Störungsgrad durch Aussenlärm erreicht ($D_{nT,w} > 40$ dB). Werden statt ein ALD zwei oder mehrere gleiche ALD eingesetzt, muss die Element-Normschallpegeldifferenz jeweils um 3 dB reduziert werden. Wird in der Aussenwand kein ALD eingebaut, wird eine Standardschallpegeldifferenz von 48 dB erreicht (womit gemäss SIA 181 sogar die Mindestanforderungen für sehr starken Aussenlärm erfüllt wären).



Figur 4-21: Standardschallpegeldifferenzen $D_{nT,w}$ in Funktion der Normschallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$
 grosser Raum: $S_{tot} = 15 \text{ m}^2$, $V = 100 \text{ m}^3$, $T_0 = 0.5 \text{ s}$
 kleiner Raum: $S_{tot} = 8.2 \text{ m}^2$, $V = 30 \text{ m}^3$, $T_0 = 0.5 \text{ s}$

4.6. Weitere Beurteilungen

Um einen qualitativen Überblick über die untersuchten Aussenluftdurchlässe zu erhalten, sind nach den Untersuchungen alle ALD nach den aus Kapitel 3.1. relevanten Beurteilungskriterien bewertet worden. Diese Beurteilung kann der Tabelle 4-3 entnommen werden. Bei den einzelnen ALD wurde jeweils die bestmögliche Ausführung betrachtet (d.h. mit Sturmsicherung, Filter, Schallschutz, usw. falls vorhanden).

Bezeichnung		F-SH-O	W-A-Q	W-A-H	W-R-OS	W-R-SOU	F-SH-OU	F-SH-H	W-R-R	F-A-O
Schematische Darstellung der Luftführung: Seitenansicht	Gewichtung									
Schematische Darstellung der Luftführung: Aufriß										
Aussenluftvolumenstrom bei Auslegungsdruckdifferenz gross	2	+	++	- ⁴⁾	+	+	0	+	+	++
Ausführung des Luftfilters (Qualität)	3	¹⁾	++	++	+	+	¹⁾	¹⁾	+	¹⁾
Zugluftrisiko im Aufenthaltsbereich, Komfort	3	+	++	-	++	+	+	--	+	0
Insektenschutz	1	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Schlagregenschutz (mit dem dazugehörigen Wetterschutz)	2	++	²⁾	+	0	0	0	0	²⁾	+
Schallschutz	3	⁵⁾	+	+	+	+	⁵⁾	⁵⁾	+	++
Kondenswasserschutz raumseitig	2	0	++	-	+	+	0	0	+	+
Regulierbarkeit des Volumenstroms	2	³⁾	³⁾	++	+	+	+	+	+	++
Luftdichtigkeit im geschlossenem Zustand	2	-	-	++	+	+	+	+	-	++
Volumenstrombegrenzung oder Sturmsicherung	1	+	-	-	++	++	-	-	-	-
Einfache Bedienung	1	³⁾	++	++	+	+	+	+	-	+
Einfacher Filterwechsel, Zugänglichkeit	2	¹⁾	++	++	++	++	¹⁾	¹⁾	+	¹⁾
Anschaffungskosten gering	3	++	--	-	+	+	++	++	+	-
Geringer baulicher Aufwand bei einem Neubau	3	++	+	+	+	+	++	++	+	+
Geringer baulicher Aufwand bei einem Umbau (Sanierung)	3	++	--	-	0	0	++	++	0	+

Zeichenerklärung:

- ¹⁾ Vom Hersteller kein Filter vorgesehen
²⁾ Weder von uns untersucht noch vom Hersteller angegeben
³⁾ Volumenstrom kann nicht manuell verändert werden
⁴⁾ Volumenstrom infolge des hohen Filterabscheidungsgrades relativ gering
⁵⁾ Dieses Modell verfügt nicht über einen Schalldämpfer

Bewertung:

- ++ *sehr zufriedenstellend*
+ *zufriedenstellend*
0 *nur bedingt.*
- *nicht zur vollen Zufriedenheit*
-- *nicht zufriedenstellend*

Gewichtung:

- 3 *ausserordentlich wichtig*
2 *wichtig*
1 *wünschenswert*

Tabelle 4-3: Beurteilungsmatrix der untersuchten Aussenluftdurchlässe

5. Messobjekt Leuenweg

5.1. Kurzbeschreibung Objekt Leuenweg

Lage, Objekt

Das Mehrfamilienhaus am Leuenbach (Gröbly Fischer Architekten, Forch) liegt am Nordosthang des Pfannenstils auf 560 m.ü.M am Dorfausgang von Hinteregg in einer zweigeschossigen Wohnzone. Es wurde 1998 zusammen mit einem Doppelhaus fertiggestellt.

Es handelt sich um ein 2-spänniges Mehrfamilienhaus mit je einer 4 1/2- und einer 6 1/2-Zimmerwohnung im EG und im OG, sowie zwei Dachwohnungen mit Galerie.

Die sechs zweibündigen Eigentumswohnungen werden über ein offenes, unbeheiztes Treppenhaus erschlossen.

Konstruktion

Die Tragkonstruktion aller Wände und Decken über dem betonierten Untergeschoss ist aus Holz gefertigt. Aussenwand und Dach sind je mit 24 cm Zelluloseflocken gedämmt.

Heizungssystem

Der Holzbau (gute Dämmung, hohe innere Oberflächentemperaturen, geringe Speichermasse) erfordert das Bereitstellen von wenig Wärme auf niederem Temperaturniveau. Die Wärme wird durch eine Abluft- und eine Erdsonden-Wärmepumpe erzeugt und über eine Bodenheizung an die Räume abgegeben.

Lüftungssystem

Um den Minergie-Standard zu erfüllen und den Kondensatproblemen an den Fenstern von solchen Bauten mit hoher Luftdichtigkeit entgegenzuwirken, wurde eine Abluftanlage mit definierten Aussenluftdurchlässen (ALD) und Abwärmenutzung eingebaut.



Figur 5-1: Mehrfamilienhaus Leuenweg 4

5.2. Resultate Luftdurchlässigkeitsmessungen

Die Planer (Gröbly Fischer Architekten) haben nach Fertigstellung des Gebäudes (Innenausbau teilweise noch nicht beendet) der Firma Isocell den Auftrag erteilt, die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle zu bestimmen.

Die Messungen erfolgten für 2 Teilbereiche, einerseits für eines der beiden Doppel-EFH, andererseits für eine Dachwohnung im Mehrfamilienhaus. Das Resultat des EFH kann näherungsweise auch für Wohnungen im EG und 1.OG des Mehrfamilienhauses herbeigezogen werden.

Die beiden Messungen beinhalteten keine Vorkehrungen zur Unterbindung des Luftaustauschs zu Nachbarwohnungen, so dass hier gewisse Einflüsse nicht auszuschliessen sind.

Folgende $n_{L,50}$ -Werte wurden ermittelt:

- EFH : $0,41 \text{ h}^{-1}$
- MFH, Dachwohnung: $1,65 \text{ h}^{-1}$

Die Messfirma stellt die Resultate dar im Vergleich zur damals gültigen SIA-Empfehlung 180 (1988), wo für Gebäude mit Abluftanlagen ein Bereich von $n_{L,50}$ von 2 - 3 h^{-1} empfohlen wird.

Die Aussage lautete, dass das Gebäude sehr dicht sei, abgesehen von gewissen lokalen Lecks.

Aus heutiger Sicht ist der Vergleichswert unzutreffend, da mit der genannten Kategorie damals Gebäude mit Abluftanlagen ohne Aussenluftdurchlässe (ALD) bezeichnet wurden, bei denen also die Zuluft über die Gebäudeleckage einströmt.

Aus heutiger Sicht wäre die Gebäudehülle selber für das vorliegende System noch dichter auszuführen, weil ja die geplanten Volumenströme zum einem grossen Teil durch die ALD und eben nicht zufällig verteilt durch die Gebäudehülle einströmen sollen.

5.3. Ziele der Messungen und Erhebungen

Bekanntermassen liegen für das hier eingebaute Abluftsystem mit definierten Abluftdurchlässen weder umfangreiche Planungsunterlagen/Richtlinien, noch detaillierte Kenntnisse über das entsprechende Verhalten vor. So wurde vereinbart, im vorliegenden P+D-Projekt die Komfortverhältnisse im Zusammenhang mit dem Lüftungssystem in den Räumen während eines Winters und zusätzlich die energetischen Verhältnisse (Art und Möglichkeit der Abwärmenutzung) zu untersuchen.

Das Gebäude wurde während seines zweiten Winters ausgemessen, d.h. gegen Ende der zweijährigen Garantiefrist.

Die Bearbeitung geschah zweistufig, indem die „Befürchtungen“ über Komfortprobleme infolge von Kaltluftströmen und zu hoher Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich zuerst anhand eines Typraums rechnerisch beurteilt wurden [Fluck, 2000].

Bereits vor Inangriffnahme des Messprojektes waren Messungen zur Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle durchgeführt worden, die ebenfalls einbezogen wurden (vgl. Kapitel 5.2.).

Ausgehend von den Resultaten der Berechnungen wurden die Messstellenpläne und entsprechende Detail-Untersuchungspläne für die zweite Stufe, die Hauptmessungen, festgelegt.

Folgende Zielsetzungen wurden fixiert:

1. Volumenströme: Beurteilung der Volumenströme und Druckverhältnisse im gesamten Lüftungssystem (erweiterte Abnahme im Vergleich zu Planungsdaten)
2. Komfort: Langzeitmessungen der Temperatur- und Feuchteverhältnisse (ohne Strahlungstemperatur); detailliert in 2 Wohnungen, je als Einzel-Werte in einer mittleren Zone für jede Wohnung. Zusatzmessungen zu gesamtheitlichem Komfort, insbesondere auch Luftströmungen an 2 Einzelmessstagen
3. Verhalten der Lüftungsanlage: Messung der Temperaturverteilung über dem Luftpfad und damit der Funktion der Lüftung in den Wohnungen und der Abwärmenutzung; zusätzlich energetische Messungen zur Effizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpe
4. Gesamtenergiebilanz des Gebäudes: Periodische Ablesung aller verfügbaren Zähler zur Ermittlung einer Gesamt-Jahresbilanz; Vergleich mit den Planungsvorgaben als Minergiehaus
5. Benutzerverhalten/Benutzerzufriedenheit bezüglich thermischem Komfort und Raumluftqualität und der wünschbaren Einflussnahme auf Beheizung und Lüftung



*Figur 5-2: Aussenluftdurchlass:
Rechts unten der Lufteintritt (weiser Pfeil) auf der
Aussenseite, abgedeckt mit einem Lochblech,
oben die Austrittsöffnung, welche die Luft gegen
die Decke weist (schwarzer Pfeil: Strömungs-
richtung)*

5.4. Zusammenfassung Resultate

Volumenstrommessungen

Die Planung der Abluftvolumenströme ging von folgenden Eckdaten aus, die dem Stand der Technik entsprechen:

Einzelschlafzimmer: 15 m³/h

Doppelschlafzimmer: 30 m³/h

Wohnzimmer: 30 bis 50 m³/h

Zusammen mit einer erwarteten Fassadenleckage von etwa 30 % der obigen Werte ergibt sich ein mittlerer Aussenluftwechsel der Räume zwischen 0,4 und 0,5 h⁻¹.

Die Realität zeigt, dass trotz eines bereits verstärkten Ventilators die Abluftvolumenströme nur etwa 2/3 des Planungswertes erreichen. Weit gravierender ist hingegen, dass der Hauptanteil des Volumenstroms nicht durch die ALD einströmt, sondern durch irgendwo verteilte Leckagen in der Gebäudehülle.

Die bei den ALD durchtretenden Ströme von einigen m³/h sind teilweise auch die Folge von relativ kleinen Differenzdrücken über der Fassade.

Ursachen für das vorliegende Verhalten könnten folgende sein:

- Unkenntnis der wirklichen Durchflusscharakteristiken von ALD mit Filtern (Herstellerangaben entsprachen Elementen ohne Filter) beim Planer
- zu wenig fundierte Planung des Drucknetzes im Gebäude, in den verschiedenen Stockwerken bei den Kanälen
- Unterschätzung der Fassadenlecks

Als Folge der vorhandenen Luftströme (nicht unähnlich in beiden gemessenen Wohnungen)

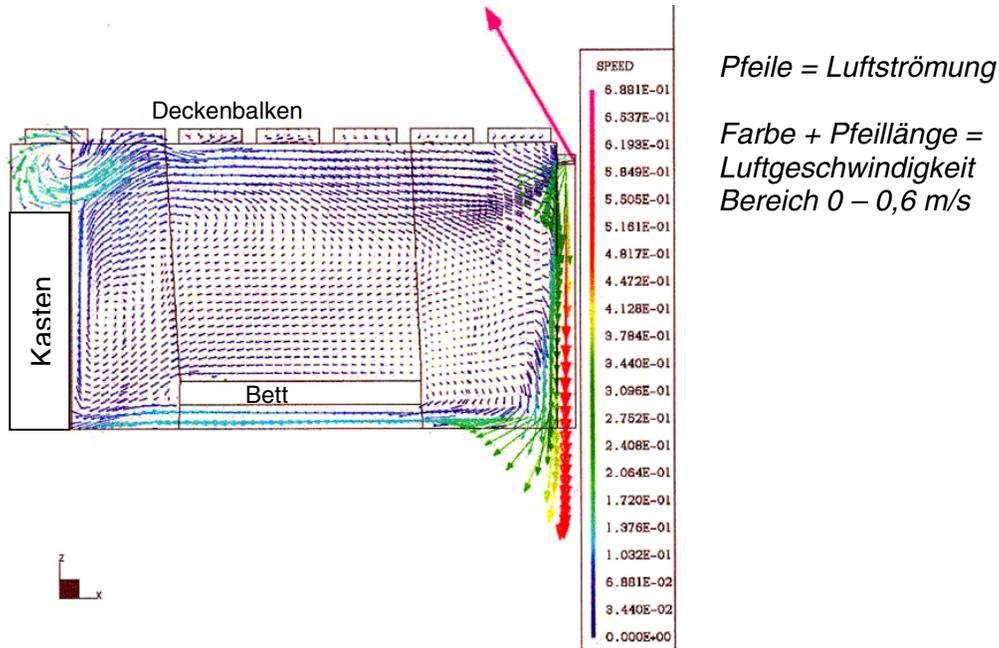
- kann die Raumluftqualität in einer Wohnung bei planungsgemäßer Nutzungsintensität ungenügend sein (die meisten Wohnungen sind in Realität unterbelegt);
- ist nicht sichergestellt, dass der notwendige Luftwechsel (von z.B. minimal 15 m³/h und Person) in jedem Zimmer vorhanden ist.

Gesamthaft gesehen ist hier bildhaft geworden, wie das Zusammenspiel von Widerstandseigenschaften der ALD und Widerstand- resp. Leckageeigenschaften der Fassade bestimmend sind, wo und wieviel Luft durchströmt. Ebenso eindrücklich ist der Umstand, dass diese scheinbar einfachen Systeme bezüglich der Fachunterlagen (Kennlinien) noch nicht genügend sind, dass sie aber auch relativ empfindlich sind auf Ausseneinflüsse. Entsprechende Abnahmemessungen sind deshalb unabdingbar. Im vorliegenden Fall erfolgten sie nur unzureichend.

Komfortberechnungen und –messungen

Berechnungen der Temperaturverteilungen und Luftströmungen in einem Typzimmer zeigten, dass bei tiefen Aussentemperaturen Kaltluftprobleme im direkten Fensterbereich auftreten können.

Eine entsprechende Darstellung im Vertikalschnitt eines Schlafzimmers ist untenstehend dargestellt.



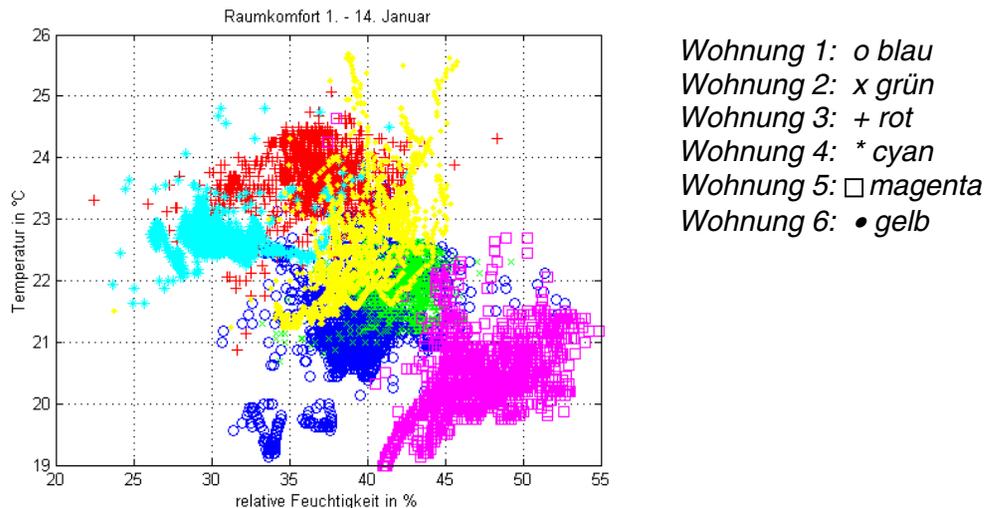
Figur 5-3: Strömungsdarstellung in Mittelebene des Raumes für Aussentemperatur von -8 °C und realistisch modellierte Innenoberflächentemperaturen, z.B. Glas innen $16,5\text{ °C}$; Lufteintritt durch ALD oberhalb Fenster schräg nach oben (Pfeil) [Fluck, 2000].

Bei den Messungen der Lufttemperaturverteilungen in den Wohnungen traten Kaltluft-Erscheinungen in weit geringerem Mass auf. Eigentliche Luftgeschwindigkeitsmessungen erwiesen sich als nicht vordringlich, da die Bewohner nicht über Zugscheinungen klagten.

Die Begründung für den merklichen Unterschied ist im Folgenden zu finden:

- die Luftströme durch die ALD sind mehrfach kleiner als die Planungswerte
- die relativ hohen Raumlufttemperaturen (eher 23 als 20 °C) heben den Komfort im Winterfall

Nachfolgend ist für den Monat Januar die Darstellung der Kombinationen von **Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte** (im Referenzpunkt im Zentrum der Wohnungen) dargestellt. Empfehlungen (SIA-Norm 180, Wärmeschutz im Hochbau, Zürich 2000) für die Luftfeuchtigkeit liegen bei 30 bis 50 %. Wegen der eher überhöhten Raumlufttemperaturen, aber auch wegen der nicht sehr intensiven Belegung der Wohnungen sind hier während einiger Zeit Feuchtwerte unter 30 % zu finden. Der unterhalb des Planungswertes liegende Luftvolumenstrom mag in dem Sinn günstig wirken, dass die Luftfeuchte nicht noch mehr absinkt. Allerdings geschieht dies wahrscheinlich örtlich auf Kosten der Raumluftqualität, sprich beispielsweise der CO_2 -Konzentration in Schlafzimmern.



Figur 5-4: Darstellung Feuchte/Temperatur im Referenzpunkt jeder Wohnung (Januar)

Leider konnte im Rahmen dieses Projektes die Frage der Raumluftqualität am Messobjekt nicht mit genügender Tiefe beurteilt werden.

Verhalten der Lüftungsanlage

Die vorliegenden Planungsvorgaben für die Luftvolumenströme, aber auch für die Art der Luftführung scheinen der Aufgabe angepasst. Einzig bezüglich der Temperatur- und Strömungssituation im Fensterbereich hegte man Zweifel.

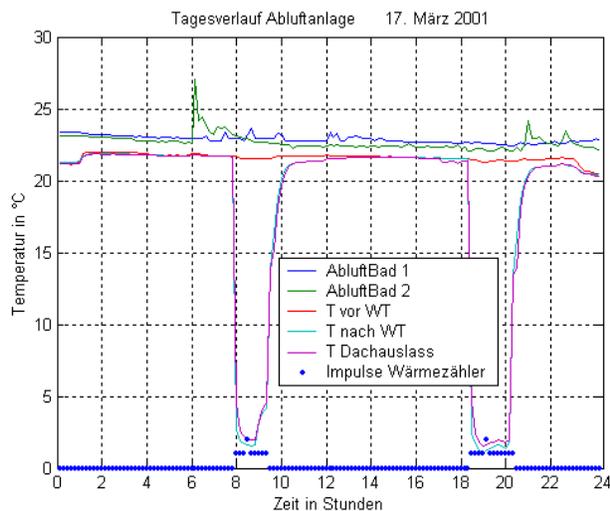
In zwei Wohnungen konnte der Temperaturgang der Luft von der Ansaugöffnung über den Fensterbereich zur zentralen Wohnungszone, zu den Nassräumen und schliesslich über die Wärmetauscher bis hin zum Ausstoss über Dach während vieler Monate verfolgt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine typische Tagessituation, eingeschlossen die Perioden des Betriebs der Wärmepumpe.

Die angesaugte Luft wird an einem solchen Wintertag im ALD um einige Grad erwärmt und kommt innenseitig nach wie vor kühl an. Ist der Luftvolumenstrom – wie gemessen - relativ klein, so durchmischt sich diese Luft relativ rasch und hinterlässt kein grösseres Unbehaglichkeitsfeld im Fensterbereich. Konsequenzen dieser Situation auf die Raumluftqualität (RLQ) in einzelnen kleineren Räumen sind hier nicht auszuschliessen.

Die Lufttemperaturen in den zentralen Zonen der Wohnungen waren relativ stabil und lagen im vorliegenden Fall eher über den geplanten Werten. In den Nasszonen wird – insbesondere während der Nutzungszeit die Luft nochmals um 1 bis 2 K erwärmt, worauf sie dann der im Keller liegenden WRG zugeführt wird.

Die Kanäle in den Vertikalschächten sind relativ gut gedämmt.

Die Luft-Wasser- Wärmepumpe vermag die Abluft etwa um 20 K abzukühlen, so dass diese mit etwa 2 – 3 °C über Dach ausgestossen wird.



Figur 5-5: Temperaturverläufe im Lüftungsstrang, typischer Tagesverlauf

Eine detaillierte Untersuchung und allfällige Optimierung des Betriebs der beiden Wärmepumpen war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Aufgefallen ist, dass die Luft-Wasser-Wärmepumpe relativ oft ausser Betrieb war, trotz des an sich guten Potentials der Wärmequelle (22 °C Ablufttemperatur).

Die Luftförderung geschah gemäss den Messungen stets auf derselben Leistungstufe.

Gesamtenergiehaushalt des Gebäudes

Vorbemerkung

Es wurde grosser Wert darauf gelegt, die Energieverbrauchsdaten des Gebäudes über ein volles Jahr zu verfolgen. Nur so lassen sich dann beispielsweise Vergleiche anstellen mit den kantonalen Anforderungswerten oder sogar bezüglich den Minergie-Berechnungswerten.

Die Ausrüstung des Gebäudes bezüglich der Messung der Brauchwarmwassermenge und der Heizenergie je Wohnung war günstig. Mehr Probleme entstanden beim nachträglichen Einbau eines Wärmehählers für die erbrachte Wärmeenergie der Luft-Wasser-Wärmepumpe und schliesslich deren Elektroverbrauchs-messung.

Diese Messgeräte waren nur während eines Teils des Jahres im Betrieb, vermittelten aber zusammen mit gewissen Stützwerten von Seiten des Gesamt-Elektroverbrauchs „Allgemeines“ und „Wärme“ klare Hinweise auf die Kenn-daten des Wärmepumpenbetriebes.

Eine andere Schwierigkeit bestand in einer präzisen Festlegung der Energiebezugsfläche EBF. Der Spielraum zwischen den Varianten der Berechnung, herrührend vom stark angeschrägten Dachgeschoss, war relativ gross. Schliesslich wurde basierend auf einem Berechnungswert von 1084 m².

Ohnehin sind Vergleiche zwischen Minergieberechnungen in der Planungsphase und Messwerten im Realbetrieb (jahresspezifische Wetterdaten, spezifische Nutzerbelegungen und – Nutzergewohnheiten) mit einem merklichen Spielraum behaftet.

Resultate

In knappen Worten kann das Messresultat bezüglich des Jahresverbrauchs folgendermassen zusammengefasst werden

Soll gemäss Minergie				Ist gemäss Methode Minergie			
BWW	Heizung	total:	Haushalt- elektrizität	BWW	Heizung	total: (inkl. Verluste)	Haushalt- elektrizität
kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a
28	17	45	17	7.20	29.89	40.80	23.29

Tabelle 5-1 Minergie-Standard

Die Soll-Werte gelten für eine Raumtemperatur von 20 °C und einer Standardnutzung für das Brauchwarmwasser.

Die Ist-Werte basieren auf den Ablesungen der Heizungswärme- und Warmwasserzähler in den Wohnungen, sowie der Elektroähler. Die Minergiemethode sieht für den Haushalt-elektrizitätsverbrauch keine Umrechnung vor. Hingegen muss die elektrisch aufgewendete Energie für die Wärmeerzeugung doppelt gerechnet werden.

Der Verbrauch an Heizenergie liegt weit über dem Planungswert (z.T. begründet mit zu hoher RL-Temperatur). Eine Umrechnung des effektiven Verbrauchswertes der Heizenergie auf den Planungswert bei einer Raumtemperatur von 20 °C lässt sich nicht einfach durchführen. Mit Bestimmtheit lässt sich aber sagen, dass der Wert für die Heizenergie unter 26 kWh/m²a liegen würde.

Der Warmwasserverbrauch ist sehr klein (etwa Hälfte des Planungswertes). So kompensieren sich der hohe Heizenergieverbrauch und der geringe Warmwasserenergieverbrauch in dem Sinn, dass der Minergieplanungswert E Wärme in etwa erreicht wird. Der Verbrauch an Haushaltelektrizität liegt über der Planung.

Beurteilung Resultate und Schlussfolgerungen

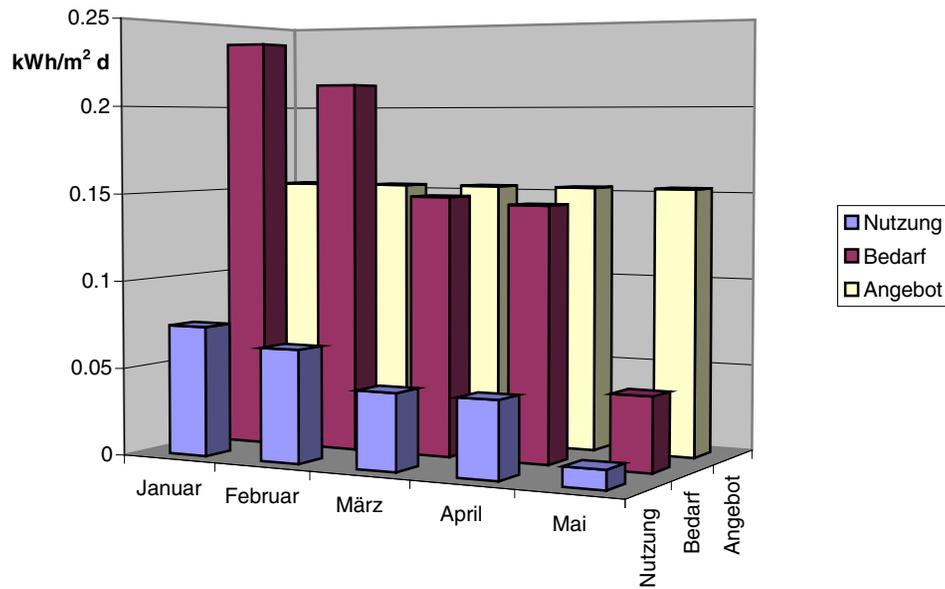
Die Planung des Lüftungssystems ist vom Konzept her zwar fachgerecht, in den Feinheiten aber nicht genügend durchgearbeitet. Ein Mangel liegt darin, dass keine genügenden Fachunterlagen und Komponentenkenndaten vorhanden waren.

Die Luftdichtigkeit der Fassade genügt in diesem Fall nicht, um mit dem System einen klar gezielten Luftvolumenstrom je Raum zu erreichen.

Im Hinblick auf die Bemühungen, den Minergie-Standard zu erfüllen, zeigt sich, dass die entsprechenden Planungswerte nicht genügend umgesetzt sind (Leckage, zu hohe Raumlufttemperaturen (Regelproblem), andere Faktoren).

Das Konzept für eine Wärmeversorgung mit Abwärmenutzung und Umweltenergie ist vielversprechend. Eine Optimierung des Betriebs bezüglich des Einsatzes der beiden Wärmepumpen ist noch nicht erfolgt, was sich deutlich in den Elektroverbrauchsziffern ausdrückt (vgl. Figur 5-6).

Störend ist auch der Umstand, dass die Einregulierung des Luftstroms nicht mit geeigneten Messinstrumenten und allfälligen Anpassungen der Komponenten erfolgt ist.



Figur 5-6: Vergleich des Wärmeangebotes aus der Abluft mit dem gesamten Wärmebedarf (Heizung und Warmwasser) und der effektiven Abwärmenutzung aus der Abluft

Eine **Benutzerbefragung** unterblieb, da während der Messperiode noch Einstellarbeiten im Gang waren.

6. Messobjekt Riedappel

6.1. Gebäude

Das Messobjekt Riedappel in Küssnacht am Rigi (Architekturbüros Oechslis und Partner, Schaffhausen) ist gegliedert in eine Wohn- und eine Gewerbe-Nutzungszone und beinhaltet 1800 m² Gewerbefläche und 19 Miet- und Eigentumswohnungen. Das Gebäude erfüllt den Minergie-Standard.

Die Nord-, Ost- und Westfassade des Hauses sind massiv in Backstein gemauert und mit verputzter Aussenwärmedämmung verkleidet. Die Südseite ist im Wohnbereich als Holzständerfassade ausgebildet mit einer hinterlüfteten Holzverkleidung.



Figur 6-1: Südostfassade des Gebäudes Riedappel in Küssnacht a.R.

Heizungssystem

Vom Energiebedarf des Gebäudes werden 75 % mit einer Erdsonden-Wärmepumpe sowie mit der Abwärmenutzung von Seiten der Abluft gedeckt. Für winterliche Spitzenzeiten steht zusätzlich eine Oelfeuerung zur Verfügung. Die Brauchwarmwasser-Erwärmung erfolgt ebenfalls über das genannte System. Die Wärmeabgabe in den Wohnungen erfolgt mittels Bodenheizung.

Lüftungssystem

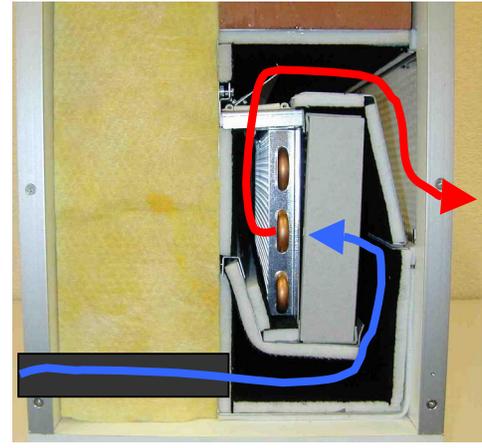
In beiden Bereichen sind Einzelraum-Lüftungsboxen mit integrierten Heizregister in der Fassade eingebaut. Diese filtern die aussen angesaugte Luft und können sie bei Bedarf mittels des Warmwasser-Registers vorwärmen. Analog zum System im ersten Fallbeispiel wird die Luft in den Nassräumen wieder abgesaugt. Ebenfalls findet anschliessend eine Abwärmenutzung mittels WP statt.



Figur 6-2: Innenansicht der Luftboxe resp. des feinen Eintrittsgitters



Figur 6-3: Ansicht in die Lüftungsboxe von der Raum-Innenseite, bei geöffnetem Deckel



Figur 6-4: Schnitt durch die Lüftungsboxe mit Heizregister, mit skizziertem Luftpfad

6.2. Messungen

In Ergänzung zum Messobjekt Leuenweg mit relativ einfachen, preisgünstigen ALD sollten Untersuchungen an einem zweiten Objekt zeigen, inwiefern aufwendigere Aussenluftdurchlässe mit Luftkonditioniermöglichkeiten den Raumkomfort verbessern würden.

Es war beabsichtigt, an zwei ausgewählten Wintertagen die Luftströmungsverhältnisse bei einer Wohnung zu untersuchen und ausserdem in der Nähe der Einlassöffnungen verfeinerte Betrachtungen des thermischen Komfortes auszuführen.

Bei den Messungen an einem typischen mittleren Wintertag (Aussenlufttemperatur um 5 °C) zeigte sich leider folgender Sachverhalt: Das Gesamt-Lüftungssystem wurde wegen abluftseitigen Mängel nicht mit den geplanten, sondern mit wesentlich kleineren Luftströmen betrieben. Die entsprechenden Messungen des Komfortes im Einlassbereich, aber auch die Messungen der Teil-Volumenströme je Zimmer sind demzufolge nicht aussagekräftig. Die Messungen wurden in der Folge abgebrochen und auf einen Zeitpunkt verschoben, bei dem das System grundsätzlich gemäss Planungsvorgaben im Betrieb sein wird.

Mündliche Kommentare von Seiten der Nutzer und erste Messeindrücke erlauben folgende Hinweise:

- Nur eine detaillierte Planung der Druckverhältnisse im System, eine sorgfältige Ausführungskontrolle und ein Systemabgleich („Abnahme“) stellen sicher, dass sich die gewünschten Volumenströme einspielen.
- Die Gebäudehülle ist sehr dicht auszuführen, wenn der Luftstrom wirklich grossteils durch die ALD erfolgen soll.
- Der Platzierung von Arbeitstischen direkt vor dem ALD ist Aufmerksamkeit zu schenken, da die direkte Anströmung des Fussbereiches zu Komfortproblemen führen kann.
- Es wäre überprüfenswert, die Wärmetauscher der ALD separat vom Heizsystem (Fussbodenheizung) anzuschliessen, um auch in Übergangszeiten eine angepasste Vorwärmung zu gewährleisten oder in bestimmten Zonen im Sommer sogar eine Vorkühlung zu ermöglichen (gilt vor allem für Anwendungen im Bürobereich).

7. Referenzen und Literaturverzeichnis

- Afjei T. et. al. (2001). *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Technisches Handbuch: Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele*. BFE-UAW
- Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik. (1989). *Handbuch der Klimatechnik, Band 1: Grundlagen*, Verlag C.F. Müller GmbH, Karlsruhe
- Awbi H.B. (1991). *Ventilation of Buildings*, Verlag: E & FN Spon, London
- Bundesamt für Energie (BFE) (2001). *Komfortlüftungen, Technische Ergänzungen zum Planer-Kit*, EnergieSchweiz, EDMZ 805.282.3d
- Bohl W. (1994). *Technische Strömungslehre*, Vogel Fachbuch aus der Kamprath-Reihe, 10. Auflage 1994
- Borsch-Laaks R. (1993). *Luftdichtigkeit der Gebäudehülle im Niedrig-Energie-Haus, Anforderungen-Messung-Baupraxis*, Sonderdruck
- Bulsing P. (2000). *Development of low energy ventilation systems*. EU Joule TIP-Vent Task 5.2. Project report
- Bundesamt für Gesundheit (BAG). (2000). *Radon: Technische Dokumentation für Baufachleute, Gemeinden, Kantone und Hauseigentümer*. EDMZ No: 311.346.d
- De Gids W., Phaff H., Knoll B. (2000). *The development of low-pressure mechanical ventilation systems LeVent*, Proceedings 21st AIVC Annual Conference, „Innovations in Ventilation Technology“, paper 1, September 2000
- Dorer V., Gröbly P., Hartmann P., Pfeiffer A. (2002). *Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung*. Eingereicht für das 12. Schweizerisches Status-Seminar 2002 "Energie- und Umweltforschung im Hochbau", ETH Zürich, Sept. 2002
- Esdorn H., Rheinländer J. (1978). *Zur rechnerischen Ermittlung von Fugendurchlasskoeffizienten und Druckexponenten von Bauteilfugen*. HLH 3/1978. S 101-108
- Feist W. (1999). *Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern*, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase II, Protokollband Nr. 17, Passivhaus Institut
- Filleux C, Raatschen W. (1989) *Bedarfsgeregelte Lüftung*. BFE
- Fluck T. (2000). *Untersuchung des Komforts bei einer kontrollierten Wohnungslüftung mit Absaugen auf der Basis von Luftgeschwindigkeit und Temperatur mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD)*. Semesterarbeit ZHW, Projektbetreuung Dr. J. Borth
- Hausladen G., Meyer Ch. (1999). *Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen*, Bau- und Wohnforschung, Frauenhofer IRB Verlag
- Hausladen G., Oehmig G. (1992). *Zuluftelemente in Wohnungen*. HLH 43 (1992) No2
- Heikkinen J., Kovanen K. et. al. (1993). : *Evaluation of draught risk from outdoor air intakes above the window*. Proceedings of Indoor Air '93. Vol. 5 pp 15
- Heiselberg P., Svidt K., Nielsen P.V. (2001). *Characteristics of airflow from open windows*. Building & Environment 36 (2001) 859-869
- Huber H., Trawnika M. (2001). *Kontrollierte Wohnungslüftung*, Dokumentation Weiterbildungskurse HTA Luzern
- Kronvall J. (1980). *Air Flows in Building Components*. Lund Institute of Technology, Sweden. Report TVBH-1002
- Löpfe U. (1992). *System-Ansatz im Haustechnikbereich (Überbauung Inwilerried, Baar)*. SI+A Nr. 45. 5. Nov. 1992

- Lozza A., Forrer M. (1999). *Kontrollierte Wohnungslüftung Spezielle Fragen zu Komfort und Hygiene*, HTA-Luzern Abteilung HLK Diplomarbeit DV_99_04 , September 1999
- Mansson LG, Svennberg S. (1992). *Demand controlled ventilating systems. Source Book*. IEA Annex 18. Swedish Council for Building Research D2: 1993, Stockholm, Sweden
- Mansson LG. (1995). *Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems - State of the Art*. IEA Annex 27. Swedish Council for Building Research, A12: 1995, Stockholm, Sweden
- Mansson LG (ed.). (2002). *IEA ECBCS Annex 27 Handbook - Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems*. Faber Maunsell Ltd., IEA ECBCS ExCo Support Service, St. Albans, UK
- Manz H. et al. (1998). *Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, Schlussbericht*, EMPA Dübendorf
- Manz H. et al. (1998). *Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, Anhang zum Schlussbericht*, EMPA Dübendorf
- Manz H. et al. (2001). *"State-of-the-art" von Einzelraumlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung*, EMPA Dübendorf
- Michael K. (2001). *Frischluftmängel trotz Abluftanlagen - Strömungsmessungen decken Ursachen auf*, EnergieEffizientes Bauen 1/2001
- Minergie-Verein. (2001). *Übersicht Lüftungssysteme*, Minergie Themenblatt Lüftung, Geschäftsstelle Verein Minergie, Bern, Mai 2001
- Mundt E., Gustavsson M., Leksell P. (2001). *Vent-convector – an experimental study*, Building Services Engineering, KTH, Stockholm, Sweden
- Nielsen P.V. (1992). *Velocity distribution in the flow from a wallmounted diffuser in rooms with displacement ventilation*, Proceedings 3rd international conference on air distribution in Rooms, ROOMVENT '92
- Orme M., Liddament M., Wilson A. (1998). *Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations*, Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), Coventry GB
- Pfluger R., Feist W., Schneiders J. (1999). *Luftführung in Passivhäusern, Planungsrichtlinien und Erfahrungen bei Ausführungsplanung und Betrieb*, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 8, Fachinformation PHI-1999/7
- Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.R. (2001). *Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik*, Ausgabe 2001/02
- Reichel D. (1996). *Wirksamkeit von Lüftungsgeräten*. Fraunhofer IRB Verlag. Bau- und Wohnforschung F2301
- Reichel D. (1999). *Zur Zuluftsicherung von nahezu fugendichten Gebäuden mittels dezentraler Lüftungseinrichtungen*. Dissertation TU Dresden
- RESHYVENT (2002). *EU Cluster project on Demand Controlled Hybrid Ventilation in Residential Buildings with specific emphasis on Integration of Renewables*. Siehe auch www.reshyvent.com
- Richter W., Reichel D. (1998). *Untersuchungen zur Luftdichtigkeit von Mehrfamilienhäusern in massiver Bauweise*, gi 119 (1998) Heft 5
- Sawachi T., Hironao S. (1997) *Evaluation of thermal comfort impact of direct air supply in winter, part 2. Comparison of different ways of air supply to exhaust only ventilation*. 18th Annual AIVC Conference, Athens, Greece, Sept. 1997
- Schälin A., Qingyan C., Moser A., Suter P. (1994). *Raumströmungsatlas*, Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL). Dokumentationsreihe für die Praxis Nr. 4, BEW und KlimaSuisse

- Scholze J. (1994). *Akustische und strömungstechnische Eigenschaften von Aussenluft-durchlässen*. Bauphysik 16 (1994), Heft 1
- Steinemann U., Tanner C. (1995). *Messwerte zur Luftdurchlässigkeit von Einfamilienhäusern, Reiheneinfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern*, NEFF- Projekt 226 - Phase 3
- TIP-Vent (2001), *Towards Improved Performances of mechanical Ventilation systems*. EU programme: Non Nuclear Energy Programme JOULE IV
- Vollebregt R., Vrins E. (2000). *Design pressure difference for self adjusting air inlets*, Proceedings 21st AIVC Annual Conference, „Innovations in Ventilation Technology“, paper 49
- Werner J., Zeller J. (1995). *Messtechnische Überprüfung und Dokumentation von Wohnungslüftungsanlagen in hessischen Niedrigenergiehäusern*, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit
- Zirngibl J., Riberon J. (1992). *Praxiserfahrung über das Betriebsverhalten von feuchtigkeitsabhängig geregelten Lüftungsanlagen in Frankreich*. Klima-Kälte-Heizung Ki 11/ 1992

Normen

EN ISO 140-10	Akustik, Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 10: Messung der Luftschalldämmung kleiner Bauteile im Prüfstand. Ausgabe 1992
EN ISO 140-3	Akustik, Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. Ausgabe 1995
EN ISO 717-1	Akustik, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 1: Luftschalldämmung. Ausgabe 1996
EN ISO 7730	Gemässigttes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Ausgabe 1995
EN ISO 9972	Wärmeschutz - Bestimmung der Luftdichtigkeit von Gebäuden - Differenz-Druck-Verfahren. Ausgabe 1992
EN 779	Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Ausgabe 1993
EN 1027	Fenster und Türen - Schlagregendichtheit - Prüfverfahren. Ausgabe 2000
EN 12208	Fenster und Türen - Schlagregendichtheit - Klassifizierung. Ausgabe 1999
prEN 12599	Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumluftechnischer Anlagen. Ausgabe 1996
prEN 13134	Lüftung von Gebäuden - Leistungsprüfung und Einbaukontrollen von Lüftungsanlagen von Wohnungen. Entwurf März 2001
prEN 13141-1	Lüftung von Gebäuden - Leistungsprüfung von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen - Teil 1: Aussenwand- und Überström-Luftdurchlässe. Ausgabe Februar 1998
prEN 13141-6	Lüftung von Gebäuden - Leistungsprüfung von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen - Teil 6: Ablufteinheiten für eine einzelne Wohnung
prEN 13779	Lüftung von Gebäuden - Leistungsanforderungen für raumluftechnische Anlagen. Entwurf 2002
SIA 180	Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau. Ausgabe 1999
SIA 181	Schallschutz im Hochbau. Ausgabe 1988
SIA V 382/1	Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen. Ausgabe 1992
DIN 1946-6	Raumluftechnik Teil 6: Lüftung von Wohnungen. Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregel). Ausgabe 1998
DIN 18 017	Teil 3, Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Aussenfenster mit Ventilatoren. Ausgabe 1990
DIN 52 210	Teil 3, Bauakustische Prüfungen, Luft- und Trittschalldämmung, Prüfung von Bauteilen in Prüfständen und zwischen Räumen am Bau. Ausgabe 1987.
DIN 52 210	Teil 4, Bauakustische Prüfungen, Luft- und Trittschalldämmung, Ermittlung von Einzahl-Angaben. Ausgabe 1984
DIN 4797	Nachströmöffnungen - Bestimmung des Strömungswiderstandes. Ausgabe 1986
VDI 2071	Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen. Ausgabe 1997
VDI 2719	Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Ausgabe 1987

Berechnungsprogramme

COMIS 3.1 (2001). Programm for modelling of multizone airflow and pollutant transport in buildings, EMPA Dübendorf, Switzerland

FLOVENT 3.1 (1999). Computational Fluid Dynamics (CFD) programm for air flow, heat transfer and contamination control simulations within rooms or buildings, Flomerics Ltd., England