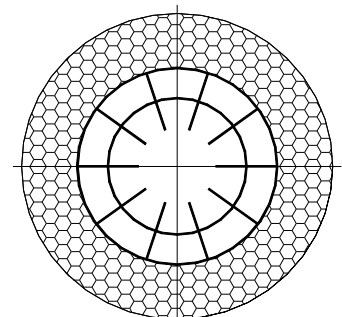
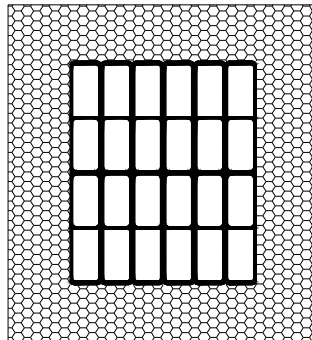
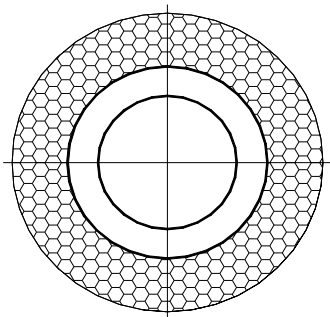


Luftkanal-Wärmetauscher

Schlussbericht



H. Huber, D. Helfenfinger
Hochschule für Technik+Architektur Luzern

Dr. H. Manz
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) Dübendorf

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

September 2000

Dieser Bericht wurde im Rahmen des BFE-Projektes **Luftkanal-Wärmetauscher (Projekt-Nr. 27'164)** verfasst.

September 2000

Autoren: Heinrich Huber¹⁾, Dominique Helfenfinger¹⁾ und Dr. Heinrich Manz²⁾

Adressen: ¹⁾ Hochschule Technik+Architektur (HTA) Luzern,
Abteilung Heizung-Lüftung-Klima,
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
²⁾ Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)
Abteilung Bauphysik
Überlandstrasse 126
CH-8600 Dübendorf

Telefon: 041 349 32 24 (HTA Luzern) und 01 823 55 11 (EMPA)

Email: hjhuber@hta.fhz.ch, heinrich.manz@empa.ch und
dfhelfenfinger@hta.fhz.ch

Projektgruppe: H. Huber, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw
D. Helfenfinger, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw
Dr. H. Manz, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), CH-8600 Dübendorf
P. Häusler, Architekturbüro, CH-8008 Zürich
G. Burren, G. Burren AG, CH-3123 Belp
P. Müller, Müller Kammer AG, CH-3063 Ittigen
R. Dräyer, Aluminium Laufen AG, CH-4253 Liesberg

Begleitgruppe: M. Zimmermann, Bundesamt für Energie (BFE/EMPA), CH-8600 Dübendorf
M. Stettler, Bundesamt für Energie (BFE), CH-3003 Bern
B. Nussbaumer, Technologievermittlung, 3013 Bern

Bezug: Hochschule Technik+Architektur (HTA) Luzern,
Abteilung Heizung-Lüftung-Klima,
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

Auflage: 100 Stück

Copyright: Hochschule Technik+Architektur Luzern
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt.

Inhaltsverzeichnis

Bericht

1	Zusammenfassung	2
2	Einführung	3
2.1	Ausgangslage	3
2.2	Ziele	3
2.3	Beteiligte Organisationen	4
2.4	Dauer des Projekts	4
3	Objekt und Methode	5
3.1	Objekt	5
3.2	Methode	5
4	Variantenvergleich	6
4.1	Grundlagen	6
4.2	Beschreibung der Varianten	9
4.3	Haupt- und Nebenvariante	17
5	Messungen an den Prototypen	18
5.1	Messaufbau	18
5.2	Prüfverfahren	18
5.3	Prüflinge	21
5.4	Messresultate Kammerprofil	22
5.5	Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher	27
5.6	Betriebscharakteristik der Luftkanalwärmetauscher	28
6	Modellierung und Simulation	29
7	Diskussion und Folgerungen	31
7.1	Technische Aspekte	31
7.2	Zukunftsperspektiven / nächste Schritte	32
8	Literatur	33

Anhang

Die folgenden Berichte sind in einem separaten Anhang dargestellt:

- A. Messbericht Nr. Pe-7766: Luftkanal-Wärmetauscher (Kammerprofil)
H. Huber, D. Helfenfinger
- B. Messbericht Nr. Pe-7766: Luftkanal-Wärmetauscher Bauart Rohr-in-Rohr
H. Huber, D. Helfenfinger
- C. Luftkanal-Wärmetauscher: Modellierung und Simulation
H. Manz, H. Huber

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren des Berichtes verantwortlich.

1 Zusammenfassung

Zusammenfassung

Es wird eine Lüftungskomponente vorgestellt, die zwei Funktionen übernimmt: Lufttransport und Wärmerückgewinnung. Aussen- und Abluftkanal werden in einem Aluminiumprofil unmittelbar nebeneinander geführt. Über die Seitenwände des Profils wird die Wärme zwischen den Medien ausgetauscht. Für Randbedingungen, welche für die kontrollierte Wohnlüftung typisch sind, wurden Experimente und Simulationen durchgeführt. Luftvolumenströme, Temperaturen, Feuchte und Druckabfall wurden an einem Prototyp messtechnisch ermittelt. Mit Programmen zur Simulation von zwei- und dreidimensionaler Wärmeleitung wurde die Wärmeübertragung berechnet und mit den Messungen verglichen. Für verschiedene Profilgeometrien wurden Simulationen durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Konzept eine Lüftungskomponente realisiert werden kann, welche eine wirksame Wärmerückgewinnung hat, zum Beispiel ein Temperatur-Änderungsgrad von 0.7 bei einer Kanallänge von 6 m. Dabei ist der Druckverlust mit typischerweise 20 Pa gering, was zu einem tiefen Ventilatorenergieverbrauch führt.

Résumé

Un composant de ventilation qui remplit deux fonctions, transport de l'air et récupération de chaleur est présenté. L'air frais et l'air évacué passent l'une à côté de l'autre à travers les deux canaux d'un profil en aluminium et l'échange de chaleur s'effectue à travers les parois du profil. Des expériences et des simulations ont été réalisées avec des conditions marginales typiques pour une ventilation contrôlée des habitations. Les débits d'air, les températures, l'humidité et les pertes de charge ont été mesurés sur un prototype. On a calculé le transfert de chaleur à l'aide de programmes de simulation de la conduction thermique bi- et tridimensionnelle et ces valeurs calculées ont été comparées avec les valeurs obtenues par mesure. Ces simulations ont été effectuées pour des profils de différentes géométries. Il est montré que ce principe permet de réaliser un composant de ventilation avec une récupération de chaleur efficace, avec par exemple un rendement thermique de 0.7 pour une longueur du profil de 6 m. Les pertes de charge, avec des valeurs typiques de l'ordre de 20 Pa, sont faibles ce qui conduit à de faibles dépenses d'énergie pour le ventilateur.

Summary

A mechanical building ventilation unit that brings together two functions – fluid transport and heat recovery – is presented. Aluminum fins in the supply air duct and in the adjacent extract air duct increase the heat flow from fluid to fluid. This unit is mainly intended to be used for residential ventilation and was investigated by means of experiments and simulations. Airflow rates, temperatures, air humidities and pressure differences were measured in an experimental set-up. Additionally, using a program for two dimensional heat conduction analyses and a simple model, the efficiency of the heat recovery was calculated and compared with measurements. Afterwards, the influence of variations of the heat exchanger geometry was investigated by means of simulations. It was shown that using this concept it is possible to realize a ventilation unit in which heat is exchanged with high efficiency, e.g. temperature efficiency of 0.7 at a duct length of 6 m. At the same time, low pressure-drops occur, typically 20 Pa, which leads to low rates of electrical energy input.

2 Einführung

2.1 Ausgangslage

Die kontrollierte Wohnungslüftung gewinnt in der Schweiz an Bedeutung. Die Nachfrage wird vor allem durch die Verkehrslärmbelastung, Gebäude mit geringem Energiebedarf (z.B. Minergie), Luftbelastungen durch Pollen und/oder Radon, sowie verschmutzte Aussenluft stimuliert. Weitere Gründe für den Einsatz sind bauphysikalische Probleme bei dichten Gebäudehüllen sowie Gesundheits- und Komfortaspekte (Wohngifte, Geruchsstoffe, Radon). Untersuchungen haben gezeigt [1], dass bei ca. 20 bis 30% der heute realisierten Wohnungslüftungsanlagen Mängel, wie zu hoher Energieverbrauch, Leckagen, ungenügende Wärmeübertragung, Schall- und Platzprobleme und hohe Investitionskosten vorhanden sind.

Der Architekt Peter Häusler hatte die Idee, in einer Hybrid-Komponente Lufttransport und Wärmerückgewinnung zu einem Luftkanal-Wärmeaustauscher zu vereinigen [2], welcher die Wärme vorwiegend über Wärmerippen in rechteckigen Aluminiumprofilen (Kammerprofil) überträgt. Dadurch lassen sich einfache und robuste Lüftungsanlagen realisieren, bei denen sich die obengenannten Mängel zum grossen Teil verhindern lassen.

Gegenüber konventionellen Lösungen für kontrollierte Wohnungslüftung soll ein Luftkanal-Wärmeaustauscher entwickelt werden, der folgende Vorteile hat:

- Ein modulares System mit wenigen Komponenten ermöglicht kostengünstige Wohnungslüftungen mit Wärmerückgewinnung
- Eine grosse wirksame Austauschfläche erlaubt eine gute Wärmerückgewinnung
- Der Druckverlust ist kleiner als bei Platten-Wärmeaustauschern, somit sinkt der Ventilatorenergieverbrauch

Die Idee, Lufttransport und Wärmerückgewinnung in einer Komponente zu kombinieren, ist schon in verschiedenen Arbeiten formuliert worden. Neben dem obengenannten Ansatz von P. Häusler sind die Rohr-in-Rohr-Wärmeaustauscher gemäss den Patentschriften [3] und [4] zu erwähnen. Die Rohr-in-Rohr-Wärmeaustauscher wurden in einem kanadischen Projekt untersucht [5]. Leider hat sich bis heute in der Lüftungstechnik noch kein Luftkanal-Wärmeaustauscher durchsetzen können.

All diese Punkte gaben den Anstoss für das BFE-Projekt 27'1645.

2.2 Ziele

In diesem Projekt werden verschiedene Luftkanal-Wärmeaustauschern untersucht, welche zu einfacheren und zuverlässigeren Anlagen führen sollen. Um dies zu erreichen, werden verschiedene mögliche Bauarten von Profilgeometrien untersucht. Die Profile werden so optimiert, dass sie folgende Anforderungen erfüllen:

- Temperatur-Änderungsgrad bei einer Wärmetauscherlänge 6 m : $\eta > 0.7$
- Geringer Druckverlust
- Herstellung mit möglichst wenig Material

2.3 Beteiligte Organisationen

An diesem Projekt waren folgende Organisationen beteiligt:

- Bundesamt für Energie (BFE), CH-3003 Bern
- Hochschule Technik+Architektur Luzern (HTA Luzern), Fachhochschule Zentralschweiz, Abteilung HLK, CH-6048 Horw
- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), CH-8600 Dübendorf
- P. Häusler, Architekturbüro, CH-8008 Zürich
- Aluminium Münchenstein AG, Hr. R. Dräyer, CH-4142 Münchenstein (bis Herbst `99)
Aluminium Laufen AG, Hr. R. Dräyer, CH-4253 Liesberg (ab Herbst`99)
- G. Burren AG, Lüftungsanlagen, Hr. G. Burren, CH-3123 Belp
- Müller Kamine AG, Hr. P. Müller, CH-3063 Ittigen

Das Projekt wurde vom Bundesamt für Energie finanziert. Die HTA leitete das Projekt und führte die Messungen durch. Die EMPA Dübendorf führte die rechnerischen Untersuchungen durch. Die Firmen Müller Kamine AG, Ittigen und G. Burren AG, Belp arbeiteten als KMU-Partner mit und bauten unter anderem die Prototypen. Die Aluminium Münchenstein AG stand bis Herbst 1999 als Berater bezüglich Alustrangpressprofilen bei. Mit der Liquidation der Firma entfiel diese Unterstützung. Ab Herbst 1999 wurde diese Aufgabe von der Firma Aluminium Laufen AG übernommen.

Die Kontakte zu den KMU-Partnern wurden durch die Technologievermittlung im Energiebereich des Kantons Bern hergestellt.

2.4 Dauer des Projekts

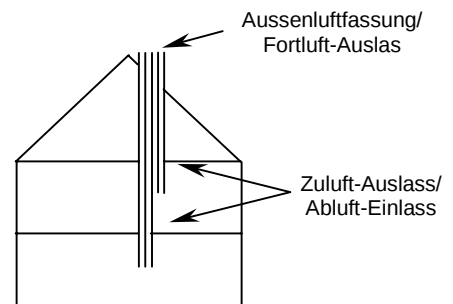
Das Projekt dauerte vom September 1998 bis Juni 2000.

3 Objekt und Methode

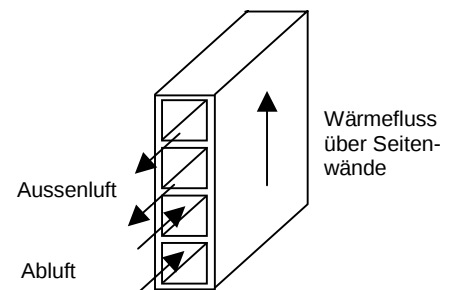
3.1 Objekt

Die Hybridkomponente Luftkanal-Wärmeaustauscher übernimmt gleichzeitig zwei Funktionen: Zu- und Abluft werden unmittelbar nebeneinander respektive ineinander positioniert und besitzen so eine gemeinsame Wärmeaustauscherfläche. Die beiden Luftleitungen bilden einen langgestreckten Gegenstromwärmeaustauscher (Figur 2). Dieser kann z.B. vertikal angeordnet werden und eine Wohnung in einem Mehrfamilienhaus mit Luft versorgen. In der Figur 1 ist eine mögliche Anordnung eines Luftkanal-Wärmeaustauschers schematisch dargestellt.

Neben der kontrollierten Wohnungslüftung kommen für die untersuchten Wärmeübertrager auch andere Einsatzgebiete in Frage (Abgaskondensation, Wasser/Luft, etc.). Die Untersuchung weiterer Anwendungsgebiete war nicht Bestandteil dieser Arbeit.



Figur 1: Einbau eines Luftkanal-Wärmeaustauschers in einem Zweifamilienhaus



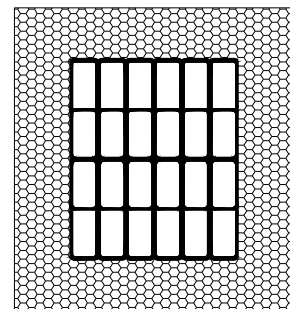
Figur 2: Wärmeaustausch in einem stranggepresstem Aluminium-Profil

3.2 Methode

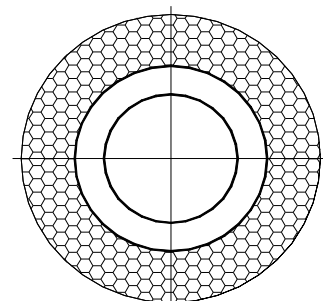
In einem Variantenvergleich wurden verschiedene mögliche Konstruktionsarten von Luftkanal-Wärmeaustauschern einander gegenübergestellt. Dabei wurden Aussagen bezüglich Querschnittsformen, Materialien für Komponenten bezüglich Herstellung, Reinigung, Leckagen, Wärmerückgewinnung, Betriebsenergie, graue Energie etc. gemacht.

Von zwei gewählten Varianten (Figuren 3 und 4) wurden Prototypen hergestellt, welche im Labor messtechnisch untersucht wurden. Das Prüfverfahren sowie die Begriffsbestimmungen der thermischen Messungen sowie die Leckagemessungen erfolgten soweit möglich in Anlehnung an die EN 308 [6] und an das VEW-Prüfreglement [7].

Mit Hilfe von Software aus dem Programmpaket Physibel [14 bis 16], mit welchem stationäre, zwei- und dreidimensionale Wärmeleitungsprobleme berechnet werden können, wurden zwei Varianten rechnerisch untersucht und die Geometrien optimiert. Diese Arbeit führte die EMPA in Dübendorf durch.



Figur 3: Kammerprofil



Figur 4: Rohr-in-Rohr-Profil

4 Variantenvergleich

Nachfolgend werden sechs verschiedene Varianten von möglichen Luftkanal-Wärmeaustauschern miteinander verglichen. Neben dem Kammerprofil werden fünf Rohr-in-Rohr-Konstruktionen definiert. Bei den Rohr-in-Rohr-Varianten werden folgende Parameter variiert: Aussenluft im Innen- oder Aussenrohr, ein oder drei Innenrohre, Innenrohre aus Stahlblech oder Kunststoff, Innenrohr glatt oder mit Wärmerippen.

Die Beurteilung der Varianten erfolgt nach folgenden Kriterien: Betriebsenergie (Elektrizität für Ventilatoren, eingesparte Wärmeenergie der WRG), Wirtschaftlichkeit (Investitionen, Jahreskosten), graue Energie, Montage, Platzbedarf und Reinigbarkeit. Die Varianten werden mit einer bestehenden konventionellen Wohnungslüftungsanlage verglichen.

Der Variantenvergleich soll aufzeigen, welche Geometrie die meisten Vorteile bietet.

Im Variantenvergleich sind die optimierten Profilvarianten (gem. Abschnitt 6) eingesetzt.

4.1 Grundlagen

Für die rechnerischen Abschätzungen werden Daten gewählt, die für eine Wohnungslüftung im schweizerischen Mittelland typisch sind. Alle Berechnungen gelten für eine Wohnung.

Gebäude/Referenzvariante

Die „Luftkanal-Wärmeaustauscher“ werden mit der im Fallbeispiel Mutschellenstrasse 103, Zürich [8] installierten kontrollierten Wohnungslüftung verglichen.

Klimadaten

Schweizerisches Mittelland:	ca. 500 m.ü.M
Mittlere Aussenlufttemperatur in der Heizsaison:	4°C
Heizgrenze:	12°C
Heiztage:	230 d

Luftvolumenströme

Der Zu- und der Abluftmassenstrom sind gleich gross. Der Volumenstrom liegt bei 120 m³/h (Zuluft pro Zimmer 30 m³/h). Die Angaben beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20°C und einem Luftdruck von 960 mbar.

Luftzustände

Abluft:	21°C, 46% rel. Feuchte
Aussenluft:	4°C, 80% rel. Feuchte

Betriebszeiten der Lüftung

Heizsaison:	dauernd eingeschaltet
Sommer:	3.5 h pro Tag eingeschaltet
Total Laufzeit pro Jahr:	6000 h

Lage der Wärmeübertrager

Die Wärmeübertrager sind vertikal installiert. AUL- und FOL-Gitter befinden sich auf dem Dach. Die Steigzone ist im beheizten Bereich.

Die Höhe (Länge) des Luftkanal-Wärmeaustauschers beträgt 6 m.

Luftförderung und Ventilatorleistung

Ventilatorwirkungsgrad: 25%

Druckverluste:

Aussenluftgitter und Filter	40 Pa
Fortluftgitter und Abluftfilter	40 Pa
Zuluft-Leitungen zwischen Gerät und Zimmer	90 Pa
Abluft-Leitungen zwischen Zimmer und Gerät	60 Pa
Wärmeübertrager der Referenzvariante, auf jeder Seite	80 Pa
Aussenluft-Leitung der Referenzvariante	20 Pa
Fortluft-Leitung der Referenzvariante	30 Pa

Wärmerückgewinnung

Die zurückgewonnene Wärmeenergie wird über den Temperatur-Änderungsgrad η abgeschätzt (mittlere Leistung). Für die Fortlufttemperatur wird die Temperatur eingesetzt, welche im FOL-Rohr am Hausaustritt vorherrscht. Diese Temperatur enthält die Ventilatorabwärme und die Erwärmung durch die Umgebung.

$$\eta = \frac{\vartheta_{ABL} - \vartheta_{FOL}}{\vartheta_{ABL} - \vartheta_{AUL}}$$

ϑ_{ABL} : Ablufttemperatur
 ϑ_{FOL} : Fortlufttemperatur
 ϑ_{AUL} : Aussenlufttemperatur

Elektrothermischer Verstärkungsfaktor (ETV)

Die Abschätzung erfolgt mit der mittleren Leistung von Wärmerückgewinnung und Ventilatorleistung.

$$ETV = \eta \cdot \frac{\dot{V}_{ABL} \cdot \rho \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{ABL} - \vartheta_{AUL})}{P_{Ventilator1} + P_{Ventilator2}} + 1$$

$\dot{V}_{ABL}$: Abluftvolumenstrom
 η : Temperatur-Änderungsgrad
 ρ : Luftdichte
 c_{pL} : spezifische Wärmekapazität der Luft
 ϑ_{ABL} : Ablufttemperatur (Raumlufttemperatur)
 ϑ_{AUL} : Aussenlufttemperatur
 $P_{Ventilator1}$: Ventilatorleistung 1
 $P_{Ventilator2}$: Ventilatorleistung 2

Graue Energie

Die Daten der grauen Energie basieren auf [9 bis 11].

Aluminium (gem. Aluminium Münchenstein ca. 80% Recyclat)

0% Recyclat: 210 MJ/kg

100% Recyclat: 24 MJ/kg

Eingesetzter Wert: 61.2 MJ/kg

Chromstahl: 46.0 MJ/kg

PP-Rohre: 80.0 MJ/kg

Steinwolle: 15.7 MJ/kg

PE-Schaum: 90.0 MJ/kg

Betriebsenergie

Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren

$$W_{\text{elektrisch}} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{total}}}{\eta_{\text{el}}} \cdot \text{BST}$$

$\dot{V}$: Volumenstrom
 Δp_{total} : gesamter Druckverlust
 η_{el} : Ventilator-Wirkungsgrad
BST: Betriebsstunden

Eingesparte Heizenergie durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung

$$Q_{\text{Heizung}} = \eta \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{\text{ABL}} - \vartheta_{\text{AUL}}) \cdot \text{BST}$$

$\dot{V}$: Volumenstrom
 ρ : Dichte
 c_{pL} : spezifische Wärmekapazität der Luft
 ϑ_{ABL} : Ablufttemperatur (Raumlufttemperatur)
 ϑ_{AUL} : mittlere Aussenlufttemperatur während der Betriebszeit
 η : Temperatur-Änderungsgrad
BST: Betriebsstunden

Investitionen

Für eine Wohnung im Referenzgebäude wurden folgende Investitionen geschätzt:

„Luftkanal-Wärmeaustauscher“	ca. Fr. 500.-
Anschlussboxen mit Ventilatoren und Filter,	
Aussenluft- und Fortluftgitter, Steuerung:	ca. Fr. 1'500.-
Installation „Luftkanal-Wärmeaustauscher“:	ca. Fr. 1'500.-

Referenzvariante mit konventionellem Lüftungsgerät:

Lüftungsgeräte Wärmeübertrager und Ventilatoren:	ca. Fr. 3'000.-
Aussen- und Fortluftanschlüsse	ca. Fr. 3'000.-

Grundkosten für alle Varianten:

Wohnungsverteilung, Planung, Bauliches, Elektriker	ca. Fr. 5'000.-
--	-----------------

Jahreskosten (gem. SIA380/1) [12]

$$K_a = I \cdot a + I \cdot f_u \cdot m_u + K_e \cdot m_e$$

K_a : Jahreskosten
 I : Investition
 a : Annuitätsfaktor
 f_u : Prozentualer Anteil Wartung und Unterhalt
 m_u : Mittelwertfaktor Teuerung, Wartung und Unterhalt
 K_e : Energiekosten
 m_e : Mittelwertfaktor Energiepreissteuerung

Nutzungsdauer

Plattenwärmeaustauscher in Lüftungsgerät:	15 a
„Luftkanal-Wärmeaustauscher“:	25 a
übrige Anlage:	25 a

Energiekosten

Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren:	20 Rp/kWh
Energieeinsparung Wärme:	6 Rp/kWh

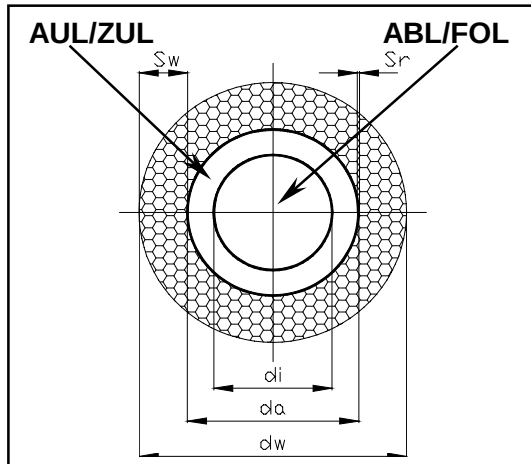
Diverses

Wartung, Unterhalt:	300.- Fr.
Amortisation und Verzinsung mittels Annuität:	Zinssatz 5%
Teuerung:	3%
Energiepreisteuerung:	3%
Annuitätsfaktor (bei einer Nutzungsdauer von 15a)	0.096%
Annuitätsfaktor (bei einer Nutzungsdauer von 25a)	0.071%
Mittelwertfaktor (bei einer Nutzungsdauer von 25a)	1.39

4.2 Beschreibung der Varianten

Auf den folgenden Seiten sind die Varianten dargestellt, welche im Vergleich berücksichtigt wurden.

Variante: Rohr-in-Rohr
Innenrohr: ABL/FOL
Aussenrohr: AUL/ZUL



Material		Dichte
Wärmedämmung	Steinwolle	60 kg/m ³
Aussenrohr	1.4301	7900 kg/m ³
Innenrohr	1.4301	7900 kg/m ³

Abmessungen		
Wärmedämmung	d _w	0.280 m
Aussenrohr	d _a	0.180 m
Innenrohr	d _i	0.125 m
Wanddicke Rohr	s _r	0.001 m
Dämmstärke	s _w	0.050 m
Länge		6.0 m

Gewicht		
Wärmedämmung	2.2	kg/m
Aussenrohr	4.5	kg/m
Innenrohr	3.1	kg/m

Beschrieb

Das ABL/FOL-Rohr (Innenrohr) wird konzentrisch im AUL/ZUL-Rohr (Aussenrohr) eingebaut. Damit beide Rohre immer den gleichen Abstand aufweisen, muss das Innenrohr ca. alle zwei Meter mit Distanzhalter fixiert werden. Die Distanzhalter können aus einem Ring (Rohrbride) mit 3 Distanzbeinen gefertigt werden. Die Distanzbeine müssen so positioniert werden, dass sie die Reinigungsarbeiten nicht beeinträchtigen. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein.

Alle Teile sind aus Chromstahl 1.4301 zu fertigen. Für die Rohre können handelsübliche geschweisste Chromstahlrohre (1.4301) eingesetzt werden.

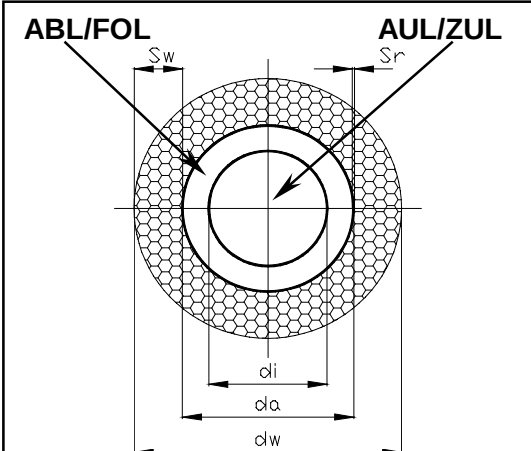
Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht einem Feuerwiderstand von F30.

Vorteile

- sehr einfache Herstellung und Montage
- im Sanierungsbereich geeignet, wenn Kernbohrungen gemacht werden müssen
- Erwärmung der AUL/ZUL durch die Umgebung

Nachteile

- schwierige Reinigung des hygienisch sensiblen AUL/ZUL-Rohres
- grosser Platzbedarf, wenn mehrere Rohre nebeneinander in einem Sammelschacht montiert werden

Variante: Rohr-in-Rohr Innenrohr: AUL/ZUL Aussenrohr: ABL/FOL		Material Wärmedämmung Steinwolle 60 kg/m ³ Aussenrohr 1.4301 7900 kg/m ³ Innenrohr 1.4301 7900 kg/m ³	
		Abmessungen Wärmedämmung d _w 0.280 m Aussenrohr d _a 0.180 m Innenrohr d _i 0.125 m Wanddicke Rohr s _r 0.001 m Dämmstärke s _w 0.050 m Länge 6.0 m Gewicht Wärmedämmung 2.2 kg/m Aussenrohr 4.5 kg/m Innenrohr 3.1 kg/m	

Beschrieb

Das AUL/ZUL-Rohr (Innenrohr) wird konzentrisch im ABL/FOL-Rohr (Aussenrohr) eingebaut. Damit beide Rohre immer den gleichen Abstand aufweisen, muss das Innenrohr ca. alle zwei Meter mit Distanzhalter fixiert werden. Die Distanzhalter können aus einem Ring (Rohrbride) mit 3 Distanzbeinen gefertigt werden. Die Distanzbeine müssen so positioniert werden, dass sie die Reinigungsarbeiten nicht beeinträchtigen. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein.

Alle Teile sind aus Chromstahl 1.4301 zu fertigen. Für die Rohre können handelsübliche geschweisste Chromstahlrohre (1.4301) eingesetzt werden.

Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht einem Feuerwiderstand von F30.

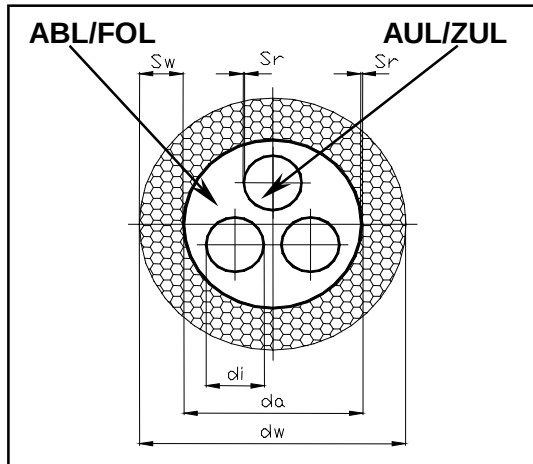
Vorteile

- sehr einfache Herstellung und Montage
- im Sanierungsbereich geeignet, wenn Kernbohrungen gemacht werden müssen
- gute Reinigungsmöglichkeit des hygienisch sensiblen AUL-Rohres

Nachteile

- keine Erwärmung der AUL/ZUL durch die Umgebung
- grosser Platzbedarf, wenn mehrere Rohre nebeneinander in einem Sammelschacht montiert werden

Variante: Rohr in Rohr
Innenrohr: 3 x AUL/ZUL
Aussenrohr: ABL/FOL



Material		Dichte
Wärmedämmung	Steinwolle	60 kg/m ³
Aussenrohr	1.4301	7900 kg/m ³
Innenrohr	1.4301	7900 kg/m ³

Abmessungen		
Wärmedämmung	d _w	0.300 m
Aussenrohr	d _a	0.200 m
Innenrohr	d _i	0.065 m
Wanddicke Rohr	s _r	0.001 m
Dämmstärke	s _w	0.050 m
Länge		6.0 m

Gewicht		
Wärmedämmung	2.4	kg/m
Aussenrohr	4.9	kg/m
Innenrohr	1.6	kg/m

Beschrieb

Im ABL/FOL-Rohr (Aussenrohr) werden drei gleich grosse AUL/ZUL-Rohre eingebaut. Diese müssen so angeordnet werden, dass zwischen den Rohren ein minimaler Abstand von 2 cm vorhanden ist. Somit ist eine Reinigung zwischen den Rohren möglich. Um diesen Abstand zu gewährleisten, müssen die Innenrohre ca. alle zwei Meter mit Distanzhalter fixiert werden. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein. Alle Teile sind aus dem Chromstahl 1.4301 zu fertigen. Für die Rohre können handelsübliche geschweisste Chromstahlrohre (1.4301) eingesetzt werden. Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht zu gleich einem Feuerwiderstand von F30.

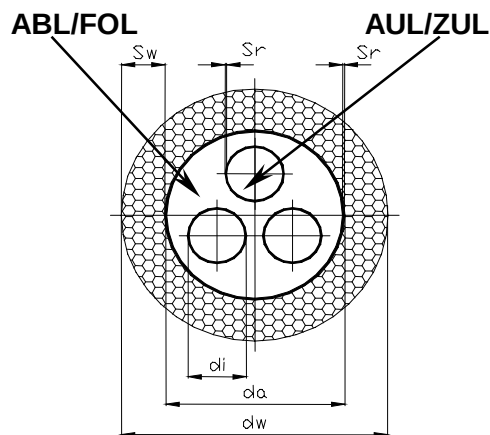
Vorteile

- im Sanierungsbereich geeignet, wenn Kernbohrungen gemacht werden müssen
- gute Reinigungsmöglichkeit der hygienisch sensiblen AUL-Rohres

Nachteile

- Aufwendige Herstellung und Montage da 3 Innenrohre vorhanden sind
- keine Erwärmung der AUL/ZUL durch die Umgebung
- grosser Platzbedarf, wenn mehrere Rohre nebeneinander in einem Sammelschacht montiert werden
- Konstruktiv kompliziertes Anschlussstück, somit hoher Druckverlust

Variante: Rohr in Rohr
Innenrohr: 3 x AUL/ZUL
Aussenrohr: ABL/FOL



Material		Dichte	
Wärmedämmung	Steinwolle	60	kg/m ³
Aussenrohr	PPs	910	kg/m ³
Innenrohr	PPs	910	kg/m ³

Abmessungen			
Wärmedämmung	d _w	0.300	m
Aussenrohr	d _a	0.200	m
Innenrohr	d _i	0.065	m
Wanddicke Rohr	s _r	0.003	m
Dämmstärke	s _w	0.050	m
Länge		6.0	m

Gewicht			
Wärmedämmung		2.4	kg/m
Aussenrohr		1.7	kg/m
Innenrohr		0.5	kg/m

Beschrieb

Im ABL/FOL-Rohr (Aussenrohr) werden drei gleich grosse AUL/ZUL-Rohre eingebaut. Diese müssen so angeordnet werden, dass zwischen den Rohren ein minimaler Abstand von 2 cm vorhanden ist. Somit ist eine Reinigung zwischen den Rohren möglich. Um diesen Abstand zu gewährleisten, müssen die Innenrohre ca. alle zwei Meter mit Distanzhalter fixiert werden. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein. Alle Teile sind aus dem Kunststoff PPs zu fertigen. Für die Rohre können handelsübliche Rohre eingesetzt werden.

Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht zu gleich einem Feuerwiderstand von F30.

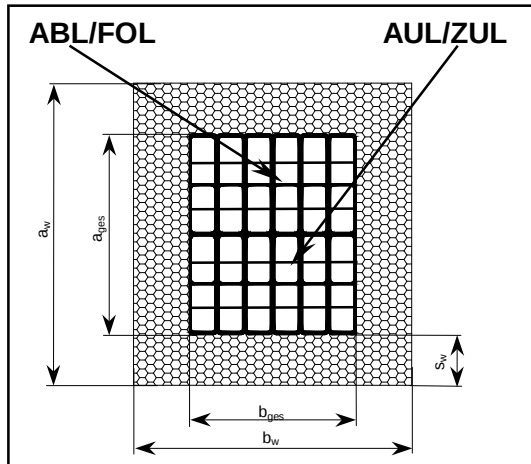
Vorteile

- im Sanierungsbereich geeignet, wenn Kernbohrungen gemacht werden müssen
- gute Reinigungsmöglichkeit der hygienisch sensiblen AUL-Rohren
- Leichtere Bauweise als der vorherige Luftkanal-Wärmeaustauscher

Nachteile

- Aufwendige Herstellung und Montage da 3 Innenrohre vorhanden sind
- keine Erwärmung der AUL/ZUL durch die Umgebung
- grosser Platzbedarf, wenn mehrere Rohre nebeneinander in einem Sammelschacht montiert werden
- Konstruktiv kompliziertes Anschlussstück, somit hoher Druckverlust

Variante: Kammerprofil
 24 ABL/FOL-Kammern
 24 AUL/ZUL-Kammern



Material		Dichte
Wärmedämmung	Steinwolle	60 kg/m ³
Profil	Aluminium	2730 kg/m ³
Kammern	24 ABL/FOL Kammern	
	24 AUL/ZUL Kammern	

Abmessungen		
Wärmedämmung	a _w	0.299 m
	b _w	0.250 m
Profil	a _{ges}	0.199 m
	b _{ges}	0.152 m
Dämmstärke	s _w	0.050 m
Länge		6.0 m

Gewicht		
Wärmedämmung	2.5	kg/m
Profil	20.4	kg/m

Beschrieb

Dieses Profil entspricht der Idee von Peter Häusler.

Bei diesem Wärmetauscher wird die Luft in rechteckige Hohlprofile durch 24 AUL/ZUL-Kammern und 24 ABL/FOL-Kammern der Wohnung zu- respektive abgeführt. Die Profile sind aus Aluminium und werden stranggepresst. Der Wärmeaustausch erfolgt nur zu einem geringen Teil über die Trennfläche zwischen den Medien (Zu- und Abluft). Der Hauptteil der Wärme fließt über die Seitenwände, das Aluminiumprofil wirkt als Wärmerippe. Die rechteckige Form erlaubt einen modularen Aufbau: je nach Luftvolumenstrom wird die gewünschte Anzahl Profile parallel angeordnet. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein.

Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht zu gleich einem Feuerwiderstand von F30.

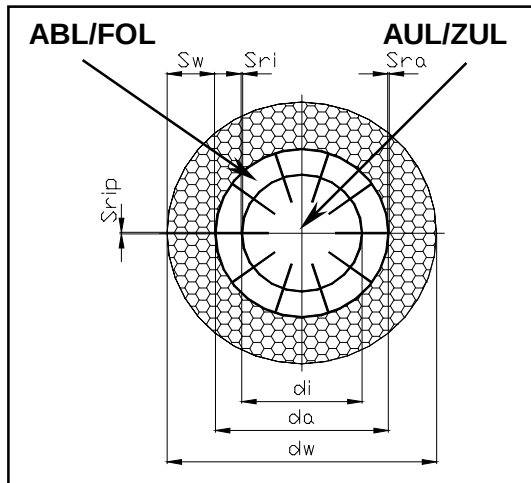
Vorteile

- einfache Herstellung und Montage
- Modularer Aufbau, somit Anpassung an den benötigten Volumenstrom
- für Neubauten und Sanierungen geeignet
- Platzsparend in Sammelschächten da rechteckiger Querschnitt
- gute Reinigungsmöglichkeit der hygienisch sensiblen AUL-Kammern

Nachteile

- bei Sanierungen sind rechteckige Durchbrüche nötig

Variante: Rohr in Rohr
Innenrohr: ABL/FOL
Aussenrohr: AUL/ZUL



Material		Dichte	
Wärmedämmung	Steinwolle	60	kg/m ³
Aussenrohr	1.4301	7900	kg/m ³
Rippenrohr	Aluminium	2730	kg/m ³

Abmessungen

Wärmedämmung	d _w	0.280	m	
Aussenrohr	d _a	0.180	m	
Innenrohr	d _i	0.125	m	
Wanddicke Rohr	s _{ra}	0.001	m	s _{ri} 0.0028 m
Wanddicke Rippe	s _{rip}	0.001	m	
Dämmstärke	s _w	0.050	m	
Länge		6.0	m	

Gewicht

Wärmedämmung	2.2	kg/m
Aussenrohr	4.5	kg/m
Rippenrohr	5.9	kg/m

Beschrieb

Das Rippenrohr wird konzentrisch im Aussenrohr eingebaut. Um den Wärmeaustausch zu steigern, wird das Innenrohr mit 10 Rippen versehen. Die äusseren Rippen dienen als Distanzhalter. Die maximale innere Rippenlänge wird durch den Herstellungsprozess (Strangpressprofil) bestimmt. Das Aussenrohr wird aus einem geschweissten Chromstahlrohr (1.4301) gefertigt. Das Innenrohr wird aus Aluminium stranggepresst. Der Anschluss des Wärmeübertragers an das Verteilnetz muss mit einem konstruktiv einfachen Anschluss geschehen. Ausserdem müssen die Anschlüsse luft- und wasserdicht sein.

Die Wärmedämmung erfolgt mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht. Dies entspricht zu gleich einem Feuerwiderstand von F30.

Vorteile

- einfache Montage
- Sanierungsbereich geeignet, wenn Steigzone durch Betondecke gebohrt wird
- gute Reinigungsmöglichkeit des hygienisch sensiblen AUL-Rohres

Nachteile

- keine Erwärmung der AUL/ZUL durch die Umgebung
- grosser Platzbedarf wenn mehrere Rohre nebeneinander in einem Sammelschacht montiert werden
- Durch den Herstellungsprozess sind maximal 12 Rippen möglich

Variante: **Referenzvariante**
Kompaktlüftungs-
gerät



Bauteil	Material	Wärmedämmung
Gehäuse	Stahlblech	/ PE-Schaum
Wärmeaustauscher	Aluminium	
Rohre	Stahlblech	/ Steinwolle

Abmessungen

Gehäuse	B	0.60	m
	H	0.70	m
	T	0.28	m

Gewicht

Gehäuse	27.0	kg
Wärmeaustauscher	4.8	kg
Wärmedämmung	19.8	kg (Steinwolle)
	ca. 1.0	kg (PE-Schaum)

Beschrieb

Als Referenzvariante dient das Fallbeispiel Mutschellenstrasse 103 in Zürich [8]. Während einer Heizperiode führte die HTA Luzern Feldmessungen an diesem Objekt durch. Drei von fünf Wohnungen wurden mit einer kontrollierten Wohnungslüftung ausgerüstet.

Die Wohnungslüftungsgeräte sind dezentral angeordnet. Die Wohnungslüftungsgeräte sind mit zwei Plattenwärmeaustauscher, welche aus Aluminium gefertigt sind und ein Gesamtgewicht von 4.8 kg haben, ausgestattet. Das Gehäuse, aus verzinktem Stahlblech (Gewicht ca. 28.2 kg), ist mit einem 12 mm dicken PE-Schaum wärmegeklämt (Gewicht ca. 1 kg).

Die Aussenluft wird an der Fassade angesaugt und dem Wohnungslüftungsgerät zugeführt. Das Aussenluftrohr ist ca. 3 m lang, hat einen Durchmesser von 125 mm und ist mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht wärmegeklämt. Die Fortluft wird über das Dach geführt. Das Fortluftrohr ist ca. 6 m lang, hat einen Durchmesser von 125 mm und ist ebenfalls mit einer 50 mm dicken Steinwollschicht wärmegeklämt.

Die Wärmerückgewinnung (Plattenwärmeaustauscher) hat einen Temperatur-Änderungsgrad von ca. 0.7. Das heisst, die Abluft übergibt ungefähr 70% der in der Abluft enthaltenen Wärme an die Zuluft. Wärmeverluste von Gerätegehäuse und Fortluftleitung, sowie die Lufterwärmung durch den Abluftventilator reduzieren den Temperatur-Änderungsgrad auf ca. 0.6. Gute Anlagen erreichen einen Temperatur-Änderungsgrad > 0.7. Diese Anlage erreicht einen elektro-thermischen Verstärkungsfaktor von 7.

Vorteile

- Kompakt da Plattenwärmeaustauscher, Ventilatoren, Regulierung und Filter integriert sind.

Nachteile

- Aufwendige Montage
- Grosser Platzbedarf für Lüftungsgerät, AUL- und FOL-Rohre
- Aufwendige Reinigung
- Leckagenströme im Gerät

4.3 Haupt- und Nebenvariante

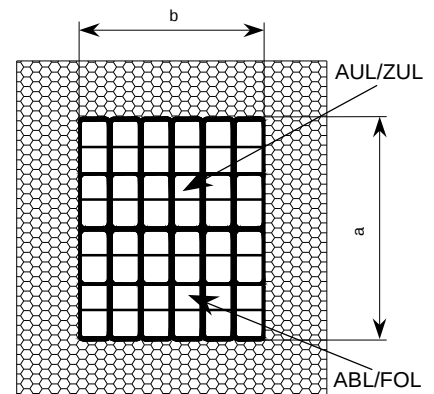
Auf Grund des Variantenvergleichs werden die folgenden drei Varianten für die Weiterbearbeitung ausgewählt:

Kammerprofil (Hauptvariante)

Das Kammerprofil (Figur 5) schneidet bezüglich eingesparte Energie eindeutig am besten ab. Wenn das Aluminium zu 80% aus Rezyklat besteht, kann die graue Energie des Wärmeaustauschers innerhalb eines Jahres mit der eingesparten Energie „zurückbezahlt“ werden. Im Vergleich mit den anderen Wärmeaustauschern sind die Jahreskosten am kleinsten.

Die rechteckige Form erlaubt eine platzsparende Installation von parallelen Wärmeaustauschern für mehrere Wohnungen.

Von diesem Wärmeaustauscher wurde ein Prototyp hergestellt. Dieser wurde messtechnisch und rechnerisch untersucht.

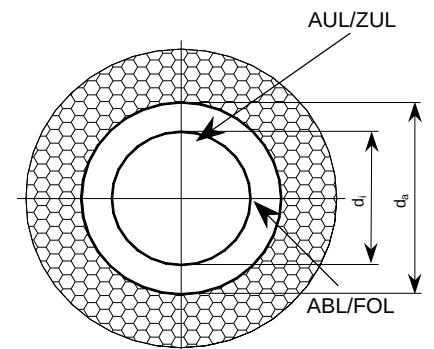


Figur 5: Kammerprofil

Rohr-in-Rohr (Nebenvariante)

Das Rohr-in-Rohr-Profil (Figur 6) ist die konstruktiv einfachste Ausführung, dadurch sind die Kosten des Wärmeaustauschers selbst gering. Dafür ist die Wärmeenergieeinsparung nur etwa halb so gross wie beim Kammerprofil.

Durch die einfache Geometrie des Wärmeaustauschers konnte sehr einfach ein Prototyp hergestellt werden, welcher nur messtechnisch untersucht wurde.



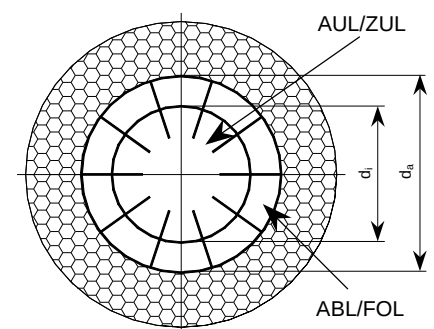
Figur 6: Rohr-in-Rohr-Profil

Rippenrohr-Profil (Nebenvariante)

Das Rippenrohr-Profil (Figur 7) erreicht beim Variantenvergleich die zweitbesten energetischen Kennwerte.

Ein Nachteil gegenüber dem Kammerprofil ist, dass kein modularer Aufbau möglich ist. Wenn eine Steigzone durch eine Kernbohrung erstellt werden muss, ist die runde Form von Vorteil.

Da die Herstellung eines Prototyps mit diesem Profil zu aufwändig gewesen wäre, wurde dieser Wärmeaustauscher nur rechnerisch untersucht und seine Geometrie optimiert.



Figur 7: Rippenrohr-Profil

5 Messungen an den Prototypen

Die Messungen an den beiden Prototypen Kammerprofil- und Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher sind in zwei separaten Messberichten dokumentiert. Diese Messberichte sind in einem separaten Anhang A und B dargestellt.

Die folgenden Abschnitte (5.1 bis 5.5) sind eine Zusammenfassung der erwähnten Arbeiten.

5.1 Messaufbau

An der Prüfstelle HLK der HTA Luzern wurde die Prüfeinrichtung aufgebaut. Die Prüfeinrichtung wurde so konzipiert, dass die für die kontrollierte Wohnungslüftung interessanten und für Geräteprüfungen [6 und 7] definierten Luftzustände nachgebildet werden konnten.

Die Aussen- und Abluft konnte in zwei getrennten Kreisen konditioniert werden. Die Abluft konnte geheizt, gekühlt, be- und entfeuchtet werden. Die Aussenluft konnte nur gekühlt werden. Beide Luftaufbereitungskreise wurden je mit einem drehzahlgesteuerten Ventilator ausgestattet, welcher einen Volumenstrombereich von 40 m³/h bis 190 m³/h abdeckte.

Entsprechend dem vorgesehenen Einsatzgebiet wurden die beiden 3 m hohen Prototypen vertikal aufgestellt. Die Aussenluft wurde von oben und die Abluft von unten zugeführt. Diese Einbaulage hatte den Vorteil, dass der Kondensatabfluss und die Vereisung praxisnah beurteilt werden konnte.

An jeder Ein- und Austrittsseite des Prüflings wurden Messfühler für Temperatur und relative Feuchte sowie eine Volumenstrommesseinrichtung angebracht. Am Kammerprofil-Wärmetauscher wurden weitere Temperaturfühler an der äusseren Oberfläche des Aluminiumprofils installiert, um den Temperaturverlauf entlang einer Rippe zu erfassen. Zusätzlich wurde der Druckverlust und die Austrittstemperaturen in den Zuluft- und Abluftkammern gemessen.

Sämtliche Messdaten wurden elektronisch erfasst und mit Hilfe eines Messprogrammes verarbeitet.

5.2 Prüfverfahren

Das Prüfverfahren und die Begriffsbestimmungen wurden soweit möglich in Anlehnung an die EN 308 [6] und an das VEW-Reglement [7] durchgeführt.

Der Temperatur-Änderungsgrad wurde nicht wie in der Norm EN 308 [6] auf die Aussenluft, sondern auf die Abluft bezogen, da der Wärmefluss durch das Gehäuse nicht als Wärmege-
winn gewertet wurde. Die Kondensationswärme wurde nur berücksichtigt, wenn bei der Mes-
sung Kondensat auftrat. Die Temperatur-Änderungsgrade wurde für einen Volumenstrombe-
reich von 50 m³/h bis 185 m³/h ermittelt, was typische Werte für 3 bis 4-Zimmer-Wohnungen
ergab. Die Messungen wurden für folgende Aussenluft- und Abluftkonditionen durchgeführt:

		Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
Ablufttemperatur	$\vartheta_{1.1}$	21°C	21°C	21°C
Abluftfeuchte	$\phi_{1.1}$	36% rel. Feuchte	46% rel. Feuchte	56% rel. Feuchte
Aussenlufttemperatur	$\vartheta_{2.1}$	-3°C	4°C	10°C
Aussenluftfeuchte	$\phi_{2.1}$	80% rel. Feuchte	80% rel. Feuchte	80% rel. Feuchte
ABL-Volumenströme Kammerprofil-WT	$q_{v1.1}$	50/80/100/120/150/ 185 m ³ /h	50/80/100/120/150/ 185 m ³ /h	50/80/100/120/150/ 185 m ³ /h
ABL-Volumenströme Rohr-in-Rohr-WT	$q_{v1.1}$	80/120/180 m ³ /h	80/120/180 m ³ /h	80/120/180 m ³ /h

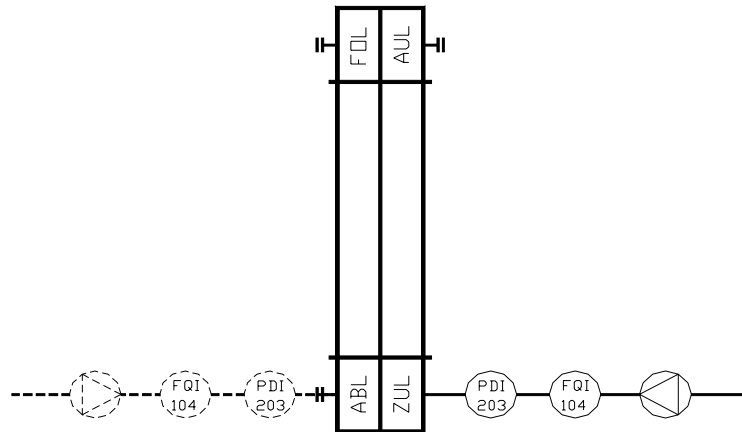
Diese Messpunkte repräsentieren typische Luftzustände während einer Heizperiode in Zen-
traleuropa.

Bei jedem Messpunkt wurde ein Massenstromverhältnis von ca. 1.0 eingestellt.

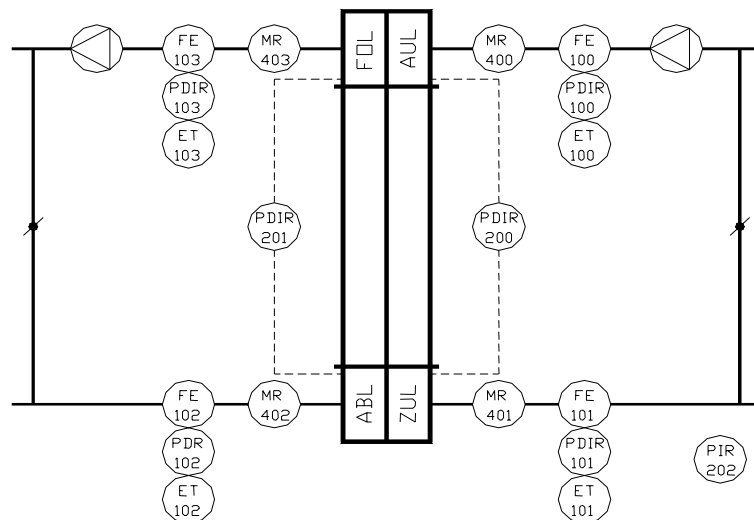
Um die Möglichkeiten und Einsatzgrenzen des Kammerprofil-Wärmeaustauschers zu ermitteln, wurden Dichtheitsprüfungen, Druckverlustmessungen und thermische Messungen durchgeführt. Weiter wurde das dynamische Betriebsverhalten (Sprungantwort) und das Einfrier- und Kondensationsverhalten des Wärmetauschers untersucht.

Der Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher war eine Nebenvariante. Aus diesem Grund wurden nur die thermische Messungen durchgeführt.

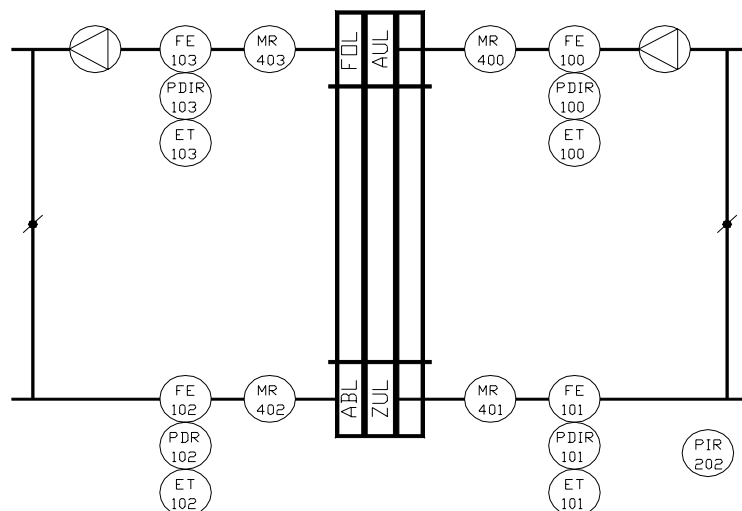
Die Messeinrichtungen für die einzelnen Untersuchungen sahen wie folgt aus:



Figur 8: Prüfeinrichtung für die Messung der externen Leckagen



Figur 9: Prüfeinrichtung Kammerprofil-Wärmeaustauscher für die Messungen bezüglich Druckverlust und Thermodynamik sowie dynamisches Betriebsverhalten, Einfrier- und Kondensationsverhalten.



Figur 10: Prüfeinrichtung Rohr-in-Rohr-Wärmeaustauscher für die thermodynamischen Messungen.

Legende:

Erstbuchstabe:

E Elektrische Grösse
F Durchfluss
M Feuchte
P Druck

Folgebuchstabe(n):

E Einrichtung
I Anzeige
R Registrierung
T Umformer / Wandler

Ergänzungsbuchstabe:

D Differenz
Q Summe / Integral

Die einzelnen Messgeräte sind in den Messberichten im separaten Anhang A und B aufgeführt.



Figur 11: Versuchsaufbau mit wärme-
gedämmten, vertikal positionierten Prüf-
ling (Mitte), AUL/ZUL-Kreis (links) und
ABL/FOL-Kreis (rechts)

5.3 Prüflinge

Kammerprofil

Der Kammerprofil-Wärmetauscher-Prototyp wurde aus handelsüblichen Strangpressprofilen hergestellt und besteht aus sechs Segmenten (Figur 12).

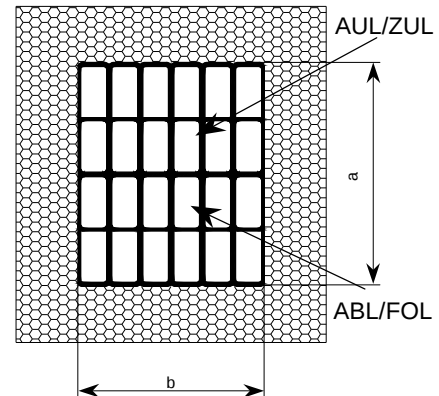
Die äusseren Wände haben eine Dicke von 2.2 mm. Die Mittelstege messen 4.1 mm und die Zwischenstege 3.5 mm. Die Länge der Profile betragen 3 m. Das gesamte Paket der sechs Segmente ist mit 100 mm Mineralwolle wärmegeklämt. Der Prüfling wird oben und unten mit Anschlussboxen versehen, welche für die Anschlüsse der AUL/ZUL-Rohre respektive der ABL-/FOL-Rohre dienen. Die Anschlussboxen sind mit Sichtfenstern ausgestattet, damit das Einfrier- und Kondensationsverhalten beobachtet werden kann.

Abmessungen: $a = 0.199 \text{ m}$
 $b = 0.150 \text{ m}$

Gewicht: $m = 57.9 \text{ kg}$

Material: Aluminium

Die Konstruktionszeichnungen des Wärmetauschers und der Anschlussboxen sind im Anhang A aufgeführt.



Figur 12: Schnittzeichnung Kammerprofil-Wärmetauscher

Rohr-in-Rohr

Der Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher-Prototyp wurde aus handelsüblichen Chromstahlrohren 1.4301 hergestellt, welche im Kaminbau verwendet werden (Figur 13). Der Prüfling wird oben und unten mit Anschlussboxen versehen, welche für die Anschlüsse der AUL/ZUL-Rohre respektive der ABL-/FOL-Rohre dienen.

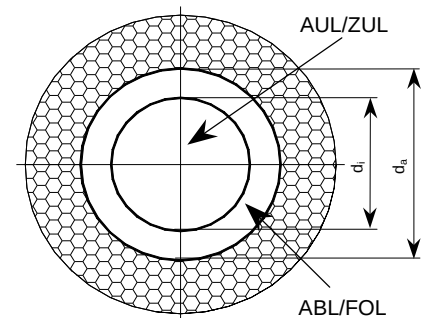
Das Innen- und das Aussenrohr haben eine Wanddicke von 1.0 mm. Der 3 m lange Prototyp ist mit 100 mm Mineralwolle wärmegeklämt.

Abmessungen: $d_i = 0.127 \text{ m}$
 $d_a = 0.150 \text{ m}$

Gewicht: $m = 23.7 \text{ kg}$

Material: 1.4301 (V2A)

Die Konstruktionszeichnungen des Wärmetauschers und der Anschlussboxen sind im Anhang B aufgeführt.



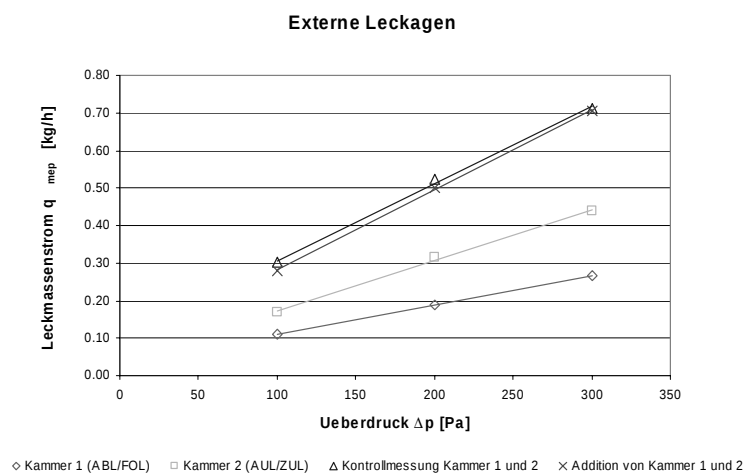
Figur 13: Schnittzeichnung Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher

5.4 Messresultate Kammerprofil

Dichtheitsprüfung

Die Dichtheit wurde gemäss dem VEW-Prüfreglement [7] bestimmt, indem eine Druckdifferenz (Überdrücken von 100 Pa, 200 Pa und 300 Pa) zwischen dem Innern (jede Kammer separat und als Kontrolle beide Kammern zusammen) und seiner Umgebung erzeugt wurde. Zusätzlich wurde der Prüfling einer visuellen Dichtheitsprüfung unterzogen.

Die Messungen zeigten, dass bei einem minimalen Massenstrom von 58.5 kg/h und einer maximalen Leckage von 0.44 kg/h eine maximale externe Leckage von ca. 0.8% vorherrschte. Die Norm EN 308 [6] schreibt vor, dass nur Prüfungen durchgeführt werden dürfen, wenn die Leckagenströme kleiner als 3% sind. Da die Leckagen deutlich unter der vorgeschriebenen Grenze lagen, konnten die Prüfungen ohne weiteren Abdichtungsmassnahmen durchgeführt werden.



Figur 14: Externe Leckagen

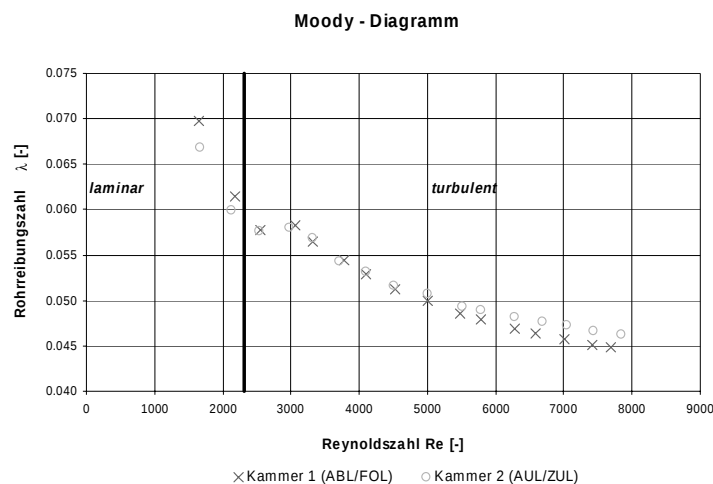
Druckverlust

Der Druckverlust über dem Kammerprofil-Wärmetauscher wurde bei isothermen Bedingungen für einen Volumenstrombereich von 40-190 m³/h gemessen.

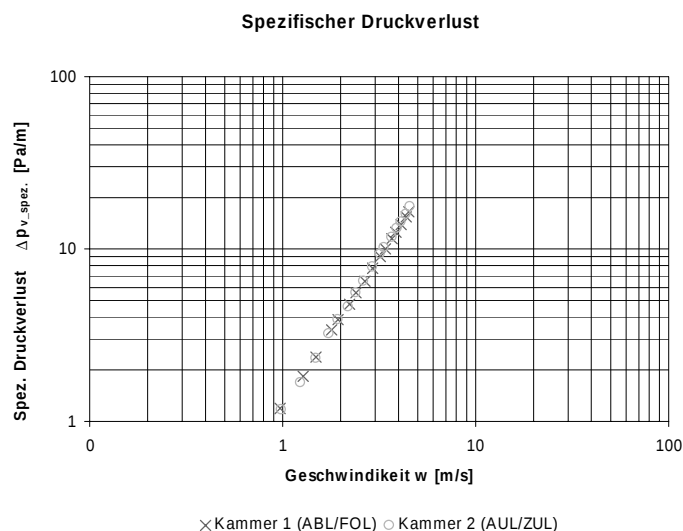
Die Messungen haben ergeben, dass die Strömung unter 1.8 m/s laminar ist.

Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s, dies entspricht einem Volumenstrom von ca. 120 m³/h, liegt der Druckverlust pro Meter Profillänge bei 8 Pa. Das heisst, ein 6 m langer Kammerprofil-Wärmetauscher (vorgesehene Einsatzlänge) hat einen Druckverlust von knapp 50 Pa.

Im Vergleich mit handelsüblichen Plattenwärmetauschern, welche in Einzelraumlüftungsgeräte eingebaut werden und einen Druckverlust von ca. 100-150 Pa haben, ist der Druckverlust zwei- bis dreimal kleiner.



Figur 15: Moody-Diagramm;
Rohrreibungszahl in Abhängigkeit der Reynoldszahl



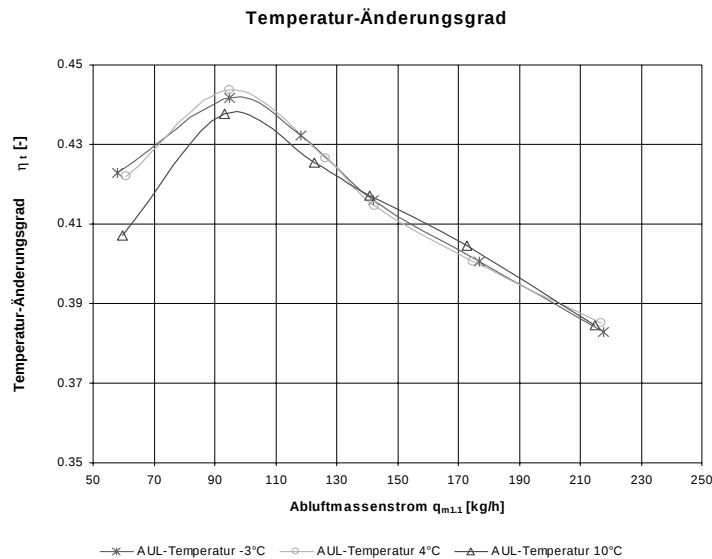
Figur 16: Spezifischer Druckverlust in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit in den Kammern

Thermische Messungen

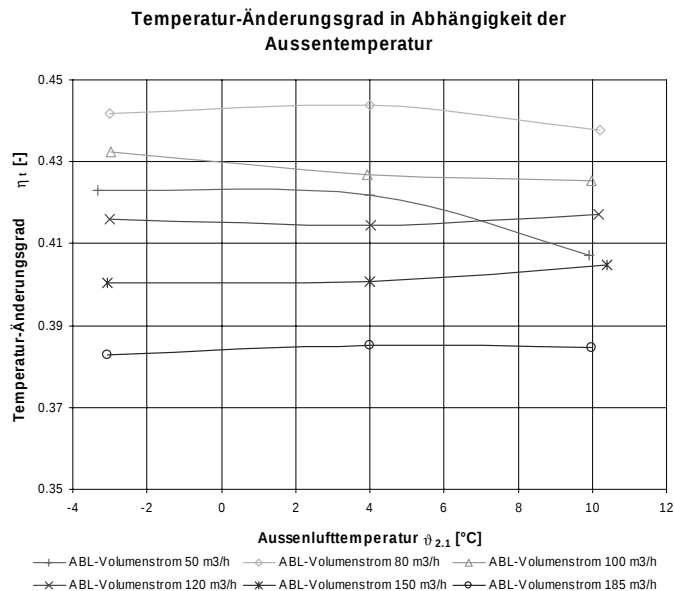
Bei einem Massenstrom von ca. 95 kg/h, respektive einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s erreichte der Temperatur-Änderungsgrad das Maximum von $\eta = 0.44$.

Da der Wärmeaustauscher eher für Volumenströme grösser 120 m³/h eingesetzt wird, erhalten wir Temperatur-Änderungsgrade im Bereich von 0.38 bis 0.42. Bei diesen Resultaten ist zu beachten, dass aus praktischen Gründen (Höhe der Halle) eine Wärmeaustauschertlänge von nur 3 m gewählt werden konnte.

Bei diesen Messungen trat keine Kondensation auf.



Figur 17: Temperatur-Änderungsgrad in Abhängigkeit des Abluftmassenstromes



Figur 18: Temperatur-Änderungsgrad in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur

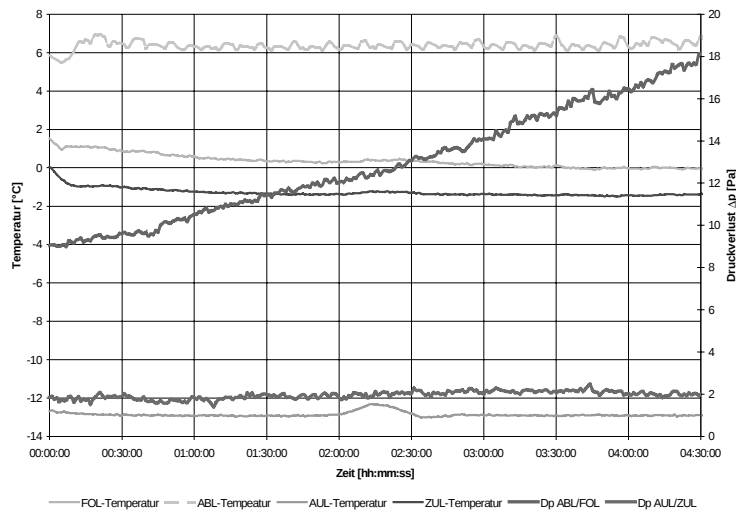
Einfrierverhalten

Unter extrem Bedingungen wurde das Einfrierverhalten des Wärmeaustauschers untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass sich nach einer Betriebszeit von ca. 4½ Stunden am Fortluftaustritt (oberes Ende) ein Eiskranz bildete, der im Laufe der Zeit den Querschnitt verengte.

In Figur 20 ist ersichtlich, dass die Fortlufttemperatur während dieser Zeit nie angestiegen war (keine Verschlechterung der Wärmeübertragung durch eine Eisschicht), somit ist die visuelle Beobachtung, dass sich nur am oberen Rand des Wärmeaustauschers Eis gebildet hat, plausibel.



Figur 19: Eiskranz am Fortluftaustritt



Figur 20: Temperatur und Druckverlauf während der Messperiode

Kondensationsverhalten

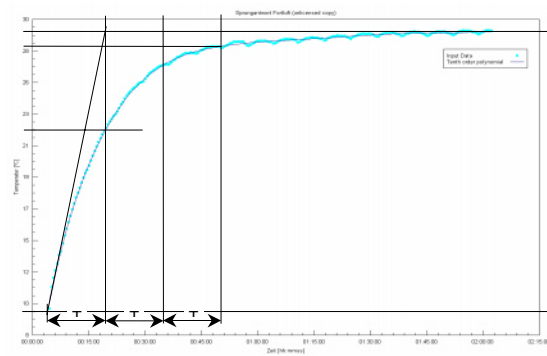
Um möglichst viel Kondensat im ABL/FOL-Kreis zu erhalten, wurde die Abluft auf ca. 80% relative Feuchte befeuchtet und die Aussenluft auf ca. -3°C abgekühlt.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Konstruktion des Wärmetauschers in unteren Geschwindigkeitsbereichen unkritisch in Bezug auf das Mitreissen von Kondensat war. Erst ab einer Geschwindigkeit von ca. 2.9 m/s resp. einem Volumenstrom von ca. 120 m³/h flossen die Kondensattropfen nicht mehr nach unten, sondern wurden mit der Fortluft mitgerissen.

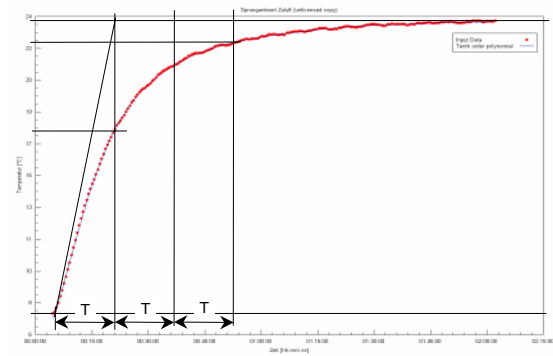
Dynamisches Betriebsverhalten (Sprungantwort)

Das dynamische Betriebsverhalten wurde durch eine plötzliche Temperaturänderung auf der Abluftseite untersucht. Dabei wurden die Temperaturverläufe (Sprungantworten) der Zuluft- und der Fortlufttemperaturen aufgenommen und die Zeitkonstanten ermittelt.

Es zeigte sich, dass der Luftkanal-Wärmetauscher eine Zeitkonstante von ca. 17 Minuten aufweist. Das heisst, durch seine grosse Masse von ca. 58 kg wird der Wärmetauscher sehr träge. Kleine Temperaturschwankungen auf der Eintrittsseite wirken sich kaum auf die Temperaturen der Austrittsseite aus.



Figur 21: Sprungantwort der Fortluft



Figur 22: Sprungantwort der Zuluft

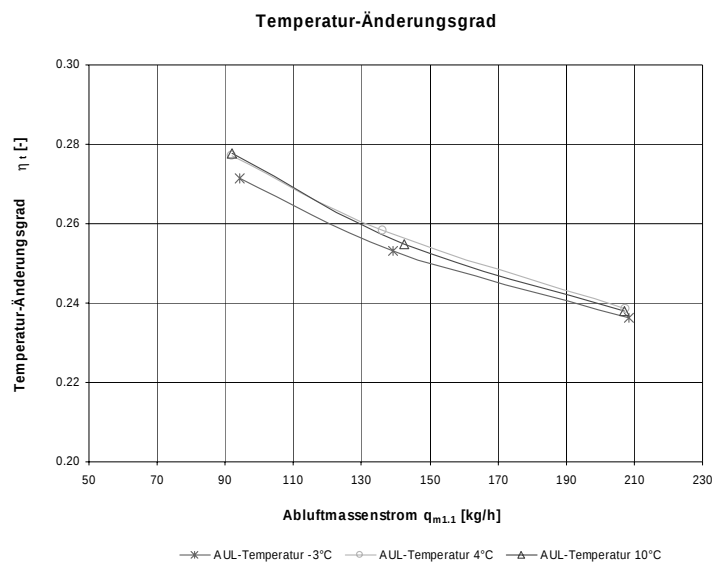
5.5 Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher

Thermische Messungen

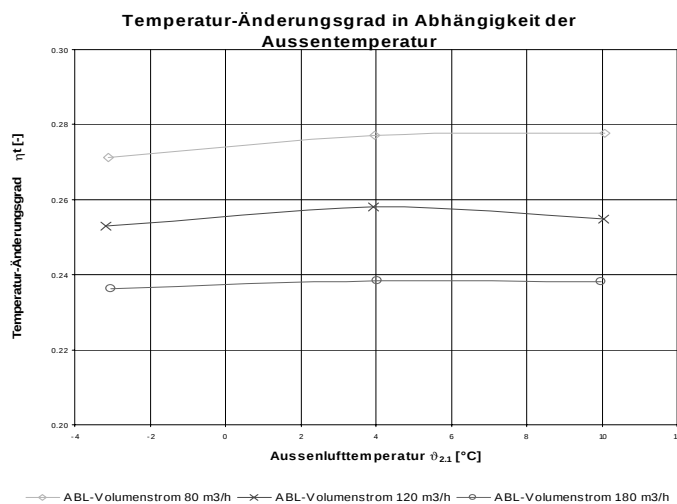
Der maximale Temperatur-Änderungsgrad von ca. 0.28 wurde bei einem Abluftmassenstrom von ca. 90 kg/h (ca. 80 m³/h) erreicht.

Da der Einsatz des Wärmeaustauscher eher für Volumenströme grösser 120 m³/h vorgesehen ist, erhalten wir Temperatur-Änderungsgrade im Bereich von 0.23 bis 0.26. Bei diesen Resultaten ist zu beachten, dass aus praktischen Gründen (Höhe der Halle) eine Wärmeaustauscherlänge von nur 3 m gewählt werden konnte.

Bei diesen Messungen trat keine Kondensation auf.



Figur 23: Temperatur-Änderungsgrad in Abhängigkeit des Abluftmassenstromes

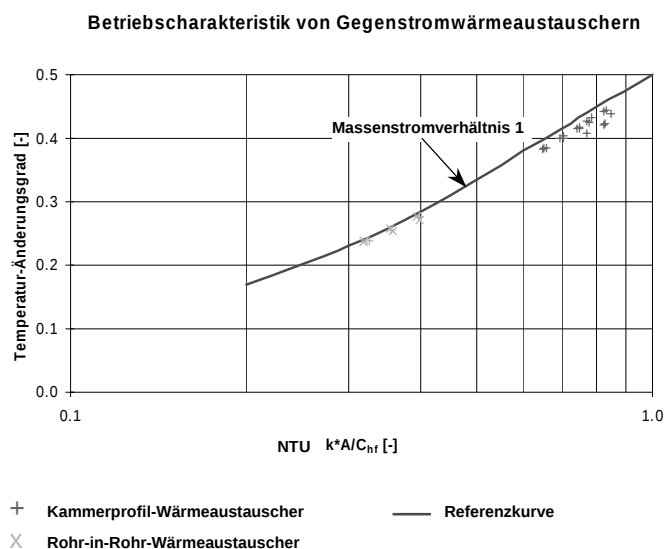


Figur 24: Temperatur-Änderungsgrad in Abhängigkeit der Aussentemperatur

5.6 Betriebscharakteristik der Luftkanalwärmeaustauscher

Um die Betriebscharakteristik der zwei Luftkanalwärmeaustauscher miteinander zu vergleichen, wurden die Temperatur-Änderungsgrade mit der Kennzahl NTU, welche sich aus dem U-Wert (früher als k-Wert bezeichnet), aus der Wärmeaustauscherfläche, aus dem Massenstrom und der spezifischen Wärmekapazität zusammensetzt, dargestellt. Diese Werte wurden mit der Referenzkurve eines idealen Gegenstromwärmeaustauschers (Massenstromverhältnis 1) verglichen [13].

Die Wärmeaustauscherfläche des Kammerprofils ist mit 1.6 m^2 pro Meter Profillänge viermal grösser als die Wärmeaustauscherfläche des Rohr-in-Rohr-Profils ($0.4 \text{ m}^2/\text{m}$). Das heisst, die Kennzahl NTU des Kammerprofils müsste ebenfalls um etwa einen Faktor vier grösser sein als beim Rohr-in-Rohr-Profil. In der Figur 25 ist ersichtlich, dass dies nicht der Fall ist. Die Kennzahl NTU des Kammerprofils sind nur etwa $2\frac{1}{2}$ mal grösser. Diese Abweichung ist auf einen schlechteren Wärmeübertragungskoeffizienten und auf den Rippenwirkungsgrad des Kammerprofils zurückzuführen. Zudem kann eine Wärmeleitung in Achsrichtung sowohl den Temperatur-Änderungsgrad wie auch die Kennzahl NTU reduzieren. Dieser Effekt wurde nicht weiter untersucht.



Figur 25: Betriebscharakteristik der Luftkanalwärmeaustauschern

6 Modellierung und Simulation

Die Modellierung und Simulation ist ausführlich im Anhang C dargestellt.

Diese Untersuchungen hatten das Ziel, die Geometrien von Kammer- und Rippenrohr-Profil nach folgenden Kriterien zu optimieren:

- Temperatur-Änderungsgrad bei einer Länge 6 m: $\eta > 0.7$
- geringer Druckverlust
- Herstellung mit möglichst wenig Material

Die Berechnungen wurden mit Hilfe der Programme KOBUR 86, BISCO und TRISCO [14 bis 16] durchgeführt.

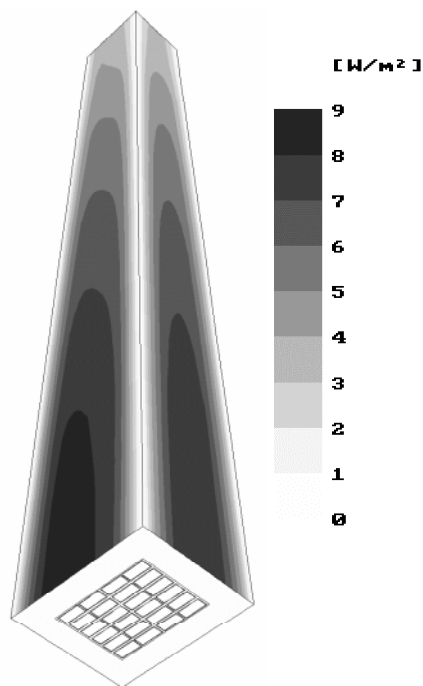
Kammerprofil

Beim Prototyp wird der angestrebte Temperatur-Änderungsgrad nicht erreicht. Der auf Basis der Messung umgerechnete Wert liegt bei $\eta = 0.62$ (bei einer Länge von 6 m). Wenn die Oberfläche durch vier zusätzliche Querstege vergrössert wird, steigt der Temperatur-Änderungsgrad auf $\eta = 0.680$ und erreicht damit knapp den angestrebten Wert von 0.7.

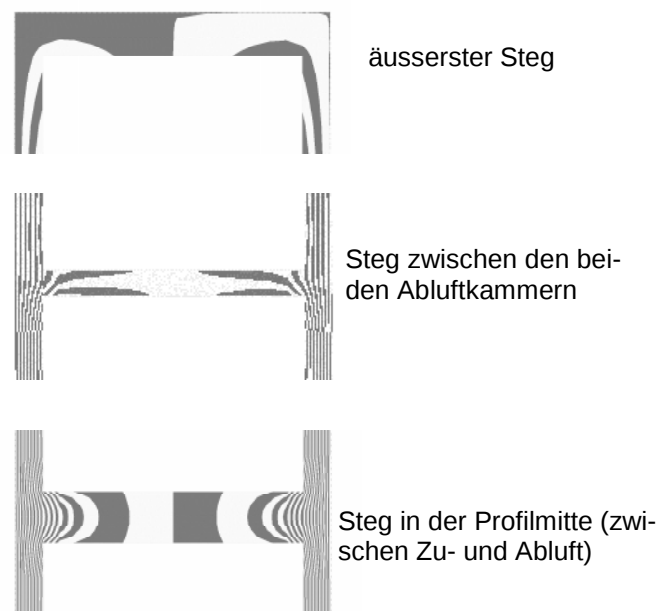
Variable Stegbreiten (in der Mitte dicker als aussen) verbessern den Temperatur-Änderungsgrad nur unwesentlich ($\eta = 0.683$).

Das Kammerprofil überträgt je nach Variante 10 bis 15% weniger Wärme, als eine direkte Trennfläche zwischen Zu- und Abluft mit gleich grosser Oberfläche (bei gleichen Temperaturen und bei gleichen Wärmeübergangskoeffizienten).

Der Wärmefluss von der Umgebung über die Wärmedämmung schwächt den Nutzen der Wärmerückgewinnung. Bei einer Dämmstärke von 50 mm erfolgt die Zulufterwärmung zu 90% über die Wärmerückgewinnung und zu 10% über die Umgebung.



Figur 26: Verteilung der Wärmestromdichte auf der Oberfläche der Wärmedämmung



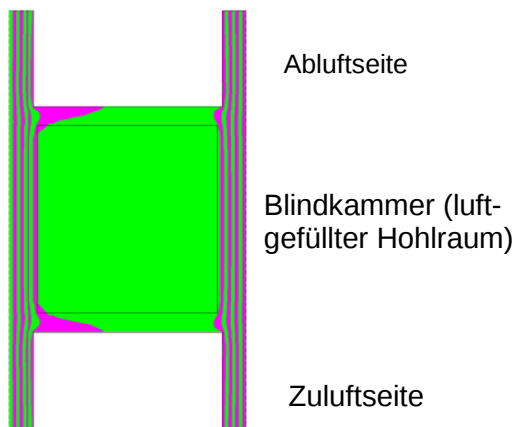
Figur 27: Wärmestromlinien auf der Abluftseite des Kammerprofils, Ablufttemperatur 1°C und Aussenlufttemperatur 0°C, Inkrement 0.02 W/m

Die Montage könnte so erfolgen, dass einzelne Profilstücke mittels Muffen zusammengesteckt werden. Ein Ansatz besteht darin, die Kupplungs- und Dichtungsteile in einer Blindkammer in der Profilmitte zu zentrieren. Die Berechnungen zeigen, dass eine Blindkammer den Temperatur-Änderungsgrad nur unwesentlich reduziert (Figur 28).

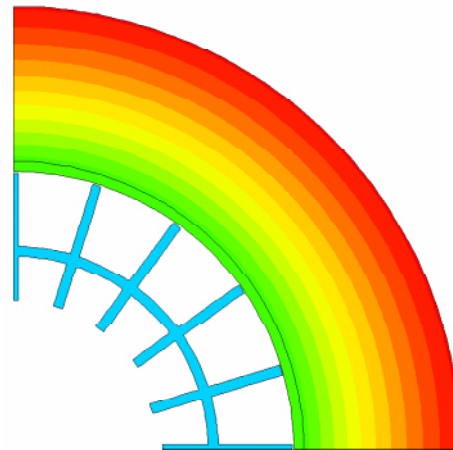
Rippenrohr-Profil

Der angestrebte Temperatur-Änderungsgrad wird bei 20 Rippen erreicht ($\eta = 0.706$). Ein entsprechendes Profil ist in Figur 29 dargestellt.

Bei einer Dämmstärke von 50 mm erfolgt die Zulufterwärmung zu 95% über die Wärmerückgewinnung und zu 5% über die Umgebung.



Figur 28: Wärmestromverteilung im zentralen Bereich eines Kammerprofils mit Blindkammer



Figur 29: Temperaturverteilung in einem Viertel des Rippenrohr-Profils

7 Diskussion und Folgerungen

7.1 Technische Aspekte

Wärmerückgewinnung

Gegenüber einem Rohr-in-Rohr-Profil können die untersuchten Varianten des Kammerprofils und des Rippenrohr-Profils bei gleichem Querschnitt und gleicher Länge rund zweimal mehr Wärme von der Abluft auf die Zuluft übertragen.

Das Ziel, mit einem Luftkanal-Wärmeaustauscher von 6 m Länge einen Temperatur-Änderungsgrad von 0.7 zu erhalten, lässt sich knapp erreichen. Beim Kammerprofil sind dazu Kammergrößen ca. 25 x 25 mm erforderlich. Profile mit kleineren Kammern kommen aus Gründen der Herstellung und Reinigbarkeit kaum in Frage. Das heisst, dass bei kleineren Längen als 6 m der angestrebte Temperatur-Änderungsgrad nicht erreicht werden kann. Eine variable Stegbreite trägt, innerhalb der vorgegebenen Randbedingungen (Herstellung) und der relativ tiefen Wärmeübergangskoeffizienten, kaum zur verbesserten Wärmeübertragung bei.

Beim Rippenrohr-Profil lässt sich erst bei einer dichten Rippenanordnung (20 Stück) der angestrebte Temperatur-Änderungsgrad von 0.7 erreichen. Entsprechende Profile sind kaum herstellbar und könnten auch nur beschränkt gereinigt werden.

Druckverlust und elektrische Energie

Die Druckverluste für Wärmerückgewinnung und Steigzone sind zusammen rund dreimal tiefer (100 Pa) als bei klassisch gebauten Wohnungslüftungsanlagen. Dementsprechend kann der Energiebedarf für Ventilatoren reduziert und der elektro-thermische Verstärkungsfaktor (ETV) etwa verdoppelt werden.

Graue Energie

Die graue Energie ist bei einer Anlage mit einem Kammerprofil-Wärmeaustauscher zirka 20-30% höher als bei klassisch gebauten kontrollierten Wohnungslüftungen. Bei einer Anlage mit Kammerprofil liegt die energetische Rückzahlzeit für eine typische kontrollierte Wohnungslüftung im schweizerischen Mittelland nur bei etwa fünf Jahren.

Hinweise für die Umsetzung

Für das rechteckige Kammerprofil ist eine Dämmstärke von 50 mm eher knapp. Für den runden Kanalquerschnitt des Rippenrohr-in-Rohr-Profils ist dieselbe Dämmstärke wohl akzeptabel. Abklärungen mit der VKF (Vereinigung Kantonaler Feuerungsversicherungen) haben ergeben, dass die Luftkanal-Wärmeaustauscher die gleichen Brandschutzvorschriften erfüllen müssen, wie vertikale Kanäle, welche durch mehrere Stockwerke geführt werden. Durch den Einbau von speziellen Absperrvorrichtungen (siehe Schweizerisches Brandschutzregister [17] ab Seite 237) kann neben der Bad- und WC-Abluft auch die Küchenabluft angeschlossen werden.

Der Konstruktion entsprechend hat der Luftkanal-Wärmeaustauscher keine Leckagen. Allfällige Undichtigkeiten können höchstens durch mangelhafte Verbindungen oder Anschlussstücke entstehen. Beim Kammerprofil ist zu beachten, dass an den Stirnseiten keine Leckstellen zwischen den einzelnen Segmenten vorhanden sind. Vor allem abluftseitig muss verhindert werden, dass so feuchte Luft in die Wärmedämmung eindringen kann. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, den Abluftventilator nach dem Wärmeaustauscher anzuordnen.

Bei einem Kammerprofil kann eine zentrale Blindkammer, welche für den Zusammenbau notwendig sein könnte, ohne wesentliche Verschlechterung der Wärmeübertragung realisiert werden. Herstellungsbedingt muss der minimale Querschnitt der Blindkammer mindestens 10 x 20 mm betragen. Verbindungen zwischen Profilstücken (Muffen resp. Kupplungen in Längsrichtung) müssen auf der Abluftseite in beiden Strömungsrichtungen wasserdicht sein.

Das heisst, dass Kondensat weder beim Hinunterfliessen noch beim Mitreisen (bei hoher Luftgeschwindigkeit) ausfliessen darf.

Das Kammerprofil verhält sich bezüglich Vereisung gutmütig. Ein Eisansatz kann zwar entstehen, er wächst aber nur sehr langsam. Der Temperatur-Änderungsgrad sinkt bei beginnender Vereisung über Stunden nur unwesentlich. Eine Vereisung könnte durch eine Temperatur- oder Drucküberwachung detektiert werden. Der Abluftventilator soll wegen dem Druckanstieg bei Vereisung eine steile Kennlinie haben, dadurch kann die Anlage ab Beginn der Eisbildung noch über Stunden ohne relevante Leistungseinbusse betrieben werden.

Bei hohen Luftgeschwindigkeiten können Kondensattropfen in der Fortluft mitgerissen werden. Falls der Abluftventilator nach dem Wärmeaustauscher angeordnet wird, ist daher ein Tropfenabscheider vorzusehen.

Die Profilgeometrien wurden so gewählt, dass einer Reinigung, z.B. mit Druckluft oder Dampf, möglich ist. Trotzdem kann auf den Einsatz von Luftfiltern nicht verzichtet werden. Je nach Verschmutzungsgrad der Luft, sollten die Filter ein- bis zweimal pro Jahr gewechselt werden. Die Reinigung eines Luftkanal-Wärmeaustauscher für eine Wohnung dürfte einen Arbeitsaufwand von drei bis vier Stunden benötigen und sollte vermutlich in einem Intervall von fünf Jahren erfolgen.

7.2 Zukunftsperspektiven / nächste Schritte

Es ist vorgesehen, das Kammerprofil in einer Pilotanlage einzusetzen und so praktische Erfahrungen bezüglich Vereisung, Kondensatablauf, Verschmutzung und Reinigung zu sammeln.

Das Kammerprofil wurde in diesem Projekt nur bezüglich Einsatz in der Lüftungstechnik untersucht. Das Kammerprofil ist grundsätzlich eine allgemein einsetzbare Wärmeübertrager-Bauart und dürfte für weitere Anwendungen, wie z.B. Abgaswärmeaustauscher, ebenfalls in Frage kommen.

Dank

Die Arbeit wurde vom Bundesamt für Energie im Rahmen des Projektes Nr. 27'164 finanziell unterstützt. Herren P. Häusler, den Firmen G. Burren AG Lüftungstechnik und Müller Kamine AG, sowie Herrn R. Dräyer danken wir für die gute Zusammenarbeit.

8 Literatur

- [1] Furter R., Huber H., Helfenfinger D.: **Prüfung von Kompaktlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung oder Abluftanlagen**; HTA Luzern, Horw, 1999
- [2] Häusler Peter: **Be- und Entlüftungsvorrichtung zur Zu- und Abfuhr von Luft in einem Gebäude**, Anmeldung zum schweizerischen Patent am 16.08.1995, Nr. 2350/95 (in Bearbeitung)
- [3] Spieldiener Robert: **Be- und Entlüftungsanlage für mehrgeschossige Bauwerke**, Offenlegungsschrift DE 33 10569 A1, Deutsches Patentamt, Anmeldungstag: 23.03.1983
- [4] Wintsch Werner und Bach Ursula: **Verfahren und Einrichtung zur Zufuhr von erwärmter Frischluft**, Europäische Patentschrift EP 0 533 629 B1, Anmeldetag: 21.09.1992
- [5] Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC)/Science Seminar: **Controlled Ventilation with Exhaust Air Heat Recovery for Canadian Housing/Pipes-Within-a-Pipe Heat Exchanger Used in Provident House**, CMHC, Ottawa 1978
- [6] SN EN 308: **Wärmetauscher- Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen**, Herausgeber Schweizerische Normen-Vereinigung, Ausgabe März 1997
- [7] VEW Energie AG, Prüfstelle für Wohnungslüftungsgeräte: **Prüfreglement für die Prüfung von zentralen Wohnungslüftungsgeräten**, VEW Energie AG, Dortmund, Ausgabe März 1998
- [8] Viridén Karl et al.: Synthesebericht Mutschellenstrasse 103, Eine mustergültige Sanierung, Herausgeber Viridén Karl, Zürich 1999
- [9] Weibel Thomas, Stritz Alexander, ETHZ-Zentrum UNL: **Oekoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen**, Bezugsquelle ENET, Postfach 142, 3000 Bern 6, Ausgabe September 1995
- [10] Gruppe ESU, Bundesamt für Energiewirtschaft: **Oekoinventare von Energiesystemen**, Bezugsquelle: ENET, 3000 Bern 6, 3. Auflage, Ausgabe Juli 1996
- [11] **Schweizerenergiefachbuch 1998**, Künzler-Bachmann AG Verlag, 12. Ausgabe
- [12] SIA 380/1: Energie im Hochbau, Herausgeber Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein, Ausgabe Juli 1993
- [13] H. Recknagel, E. Sprenger, E. Schramek (Eds.): **Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik**, München, Ausgabe 94/95
- [14] KOBUR86: **computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in objects described in a rectangular grid using the energy balance technique**, Physibel, Ausgabe 1997
- [15] TRISCO: **computer program to calculate three-dimensional steady state heat transfer in objects described in a beam shaped grid using the energy balance technique**, Physibel, Ausgabe 1997
- [16] BISCO: **computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in objects with any shape using the energy balance technique**, Physibel, Ausgabe 1997
- [17] Verein Kantonalen Feuerversicherungen (VKF): **Schweizerisches Brandschutzregister 1999**, Herausgeber VKF, Ausgabe 1999