



Fraunhofer

IBP

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

Matthias Ziegler

Innovative Fassadensanierungskonzepte mit integrierter Luftführung für den Gebäudebestand

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 37

Herausgeber:

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Schew-Ram Mehra



Universität Stuttgart

Institut für Akustik
und Bauphysik



Technische Universität München

Lehrstuhl für Bauphysik

FRAUNHOFER VERLAG



Universität Stuttgart
Institut für Akustik und
Bauphysik



Technische Universität München

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 37

Herausgeber: Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra

Matthias Ziegler

**Innovative Fassadensanierungskonzepte mit
integrierter Luftführung für den Gebäudebestand**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00
Telefax 0711 970-3395
E-Mail info@ibp.fraunhofer.de
URL www.ibp.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 1869-5124

ISBN: 978-3-8396-1503-4

D 91

Zugl.: München, TU, Diss., 2019

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2019

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.



Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Bauphysik

Innovative Fassadensanierungskonzepte mit integrierter Luftführung für den
Gebäudebestand

Matthias Christian Ziegler

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer
2. Prof. Dr.-Ing. Anton Maas

Die Dissertation wurde am 04.02.2019 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät Bau Geo Umwelt
am 22.05.2019 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Kassel. Das Promotionsvorhaben wurde im Rahmen eines dreijährigen Promotionsstipendiums von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

An erster Stelle möchte ich meiner Familie und meiner Freundin, Nancy Wunz, danken für die bedingungslose Unterstützung, für den Zuspruch, den Ansporn und die Motivation, die sie mir während der gesamten Zeit der Bearbeitung und insbesondere in der Endphase entgegengebracht haben. Ich bedanke mich für den Rückhalt und all die Kraft, die ich erhalten habe und die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein großer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl. Phys. Klaus Peter Sedlbauer, dem Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und Inhaber des Lehrstuhls für Bauphysik der Technischen Universität München, für die Übernahme des Hauptberichts unter seiner fachlichen Betreuung sowie die wissenschaftliche Begleitung. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Maas, dem Inhaber des Lehrstuhls für Bauphysik der Universität Kassel, für sein Engagement und Wirken als Zweitbetreuer dieser Arbeit danken. Ich danke meinem ursprünglichen Erstbetreuer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, dem emeritierten Inhaber des Lehrstuhls für Bauphysik der Technischen Universität München und ehemaligen Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, für die wertvolle Kritik, die er in regelmäßigen Abständen im Rahmen des Doktorandenkolloquiums geäußert hat, und für die vielen fachlichen Ratschläge.

Herrn Dr.-Ing. Michael Krause, dem Leiter der Arbeitsgruppe Anlagentechnik am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, möchte ich besonders danken, dass er mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnet und mich in allen Phasen der Arbeit mit außerordentlichem Einsatz unterstützt hat. Er hatte immer ein offenes Ohr für meine Belange und stand mir jederzeit kompetent zur Seite.

Für die finanzielle Unterstützung und das Vertrauen möchte ich mich bei der DBU sowie den Mitarbeitern des Stipendienprogramms herzlich bedanken.

Mein ganz besonderer Dank aber gilt meinen Eltern, Reinhold Richard Ziegler und Gerlinde Ziegler, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten und denen ich diese Arbeit widme.

Gefördert durch das
Stipendienprogramm der



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungen und Formelzeichen	V
Kurzfassung	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Lösungsansatz mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen	3
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise	5
2 Technische Grundlagen zur Lüftung von Gebäuden	9
2.1 Lüftung in Gebäuden	9
2.1.1 Kenngrößen der Lüftung	9
2.1.2 Dimensionierungsansätze für den Luftwechsel	10
2.1.3 Lüftungstechnische Maßnahmen nach DIN 1946-6	11
2.2 Lüftungssysteme im Gebäudebestand	13
2.2.1 Freie Lüftung	13
2.2.2 Mechanische Lüftung	14
2.3 Kriterien und Anforderungen an mechanische Lüftungssysteme	19
2.3.1 Energetische Aspekte	19
2.3.2 Hydraulische Aspekte	22
2.3.3 Akustische Aspekte	27
2.3.4 Hygienische Aspekte	29
2.3.5 Brandschutztechnische Aspekte	30
2.3.6 Komfortaspekte	32
2.4 Übersicht bautechnischer Sanierungslösungen mit Einbindung von Lüftungstechnik	34
3 Voruntersuchungen an einem realen Bestandsgebäude	38
3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	38
3.2 Gebäudebeschreibung und Lüftungskonzept	38
3.3 Messtechnische Ausstattung	40
3.4 Betriebsverhalten und Messergebnisse	42
3.4.1 Inbetriebnahme der Lüftungsanlage	42
3.4.2 Systemdruckverlust und Leistungsaufnahme der Ventilatoren	44
3.4.3 Wärmerückgewinnung	47
3.4.4 Wärmestromdichte im Außenwandquerschnitt	49
3.4.5 Relative Luftfeuchte	51
3.4.6 Erstinspektion und Reinigung	52
3.5 Zusammenfassende Bewertung	55

4	Hydraulische Bewertung der dämmstoffintegrierten Luftkanäle im Strömungslabor	57
4.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	57
4.2	Messverfahren und Aufbau	58
4.2.1	Messung des Luftvolumenstroms	58
4.2.2	Messung der Druckdifferenz	59
4.2.3	Messung der Undichtigkeit	61
4.3	Messergebnisse	62
4.3.1	Druckverlust dämmstoffintegrierter Luftkanäle	62
4.3.2	Messung der Undichtigkeit der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle	68
4.4	Zusammenfassende Bewertung	76
5	Gesamtenergetische Bilanzierung mit thermisch-hydraulisch gekoppelter Gebäudesimulation	78
5.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	78
5.2	Beschreibung des verwendeten Simulationsprogramms	79
5.3	Simulationsrandbedingungen	81
5.3.1	Bauteilaufbauten	81
5.3.2	Klimarandbedingungen	83
5.3.3	Nutzungsrandbedingungen	84
5.4	Voruntersuchungen	86
5.4.1	Modellierung der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung	86
5.4.2	Luftströmungssimulation mit TRNflow	95
5.5	Simulationsergebnisse	97
5.5.1	Energetische Bilanzierung des Demonstrationsgebäudes	97
5.5.2	Hydraulische Verteilung im Gebäude und Luftkanalnetz	99
5.5.3	Sensitivitätsanalyse	102
5.5.4	Variation der Systemgrößen auf die Energiebilanz des Gebäudes	106
5.6	Zusammenfassende Bewertung	109
6	Fassadengeführte Luftkanalsysteme im Mehrgeschosswohnungsbau	111
6.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	111
6.2	Potentiale ausgehend von der deutschen Gebäudetypologie	112
6.3	Bauliche Abhängigkeiten und einschränkende Faktoren für die Luftkanalführung	114
6.3.1	Fassadengestaltung und Grundrissanordnung	116
6.3.2	Loggien und Balkone	117
6.3.3	Brandschutzanforderungen	117
6.4	Lösungsansätze für die Luftkanalführung	118
6.5	Zusammenfassende Bewertung	123
7	Anwendungen im Wohngebäudebestand	125
7.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	125
7.2	Anwendung im Zweifamilienhaus (GK1)	125
7.2.1	Gebäudebeschreibung und untersuchte Lüftungssysteme	125

7.2.2	Untersuchungsergebnisse	126
7.3	Anwendung im Mehrgeschosswohnungsbau (GK4)	130
7.3.1	Gebäudebeschreibung und untersuchte Lüftungssysteme	130
7.3.2	Untersuchungsergebnisse	136
7.4	Zusammenfassende Bewertung	145
7.5	Weiterentwicklung der Luftkanalführung und baupraktische Optimierung	147
7.6	Kritische Auseinandersetzung mit dem Wärmedämmstoff Polystyrol.....	150
8	Bewertung des integralen Ansatzes	152
9	Zusammenfassung.....	155
	Literaturverzeichnis	161
	Abbildungsverzeichnis	170
	Tabellenverzeichnis	175
	Anhang A.....	176
	Anhang B	201

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
ALD	Außenluftdurchlass
CFD	Computational Fluid Dynamics
DiBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DN	Nenndurchmesser
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPS	Expandiertes Polystyrol
EU	Europäische Union
GK	Gebäudeklasse
GMH	Große Mehrfamilienhäuser
HBCD	Hexabromcyclododecan
HeizAnIV	Heizungsanlagen-Verordnung
IMEDAS	Internet-Messwerterfassungs- und Datenauswertungssystem
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KVS	Kreislaufverbundsystem
LFE	Laminar Flow Element
MBO	Musterbauordnung
MFH	Mehrfamilienhaus
M-LüAR	Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie
Pa	Pascal
PDD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PMV	Predicted Mean Vote
RH	Reihenhaus
RLT	Raumlufttechnik
SFP	Specific Fan Power (spezifische Ventilatorleistung)
SSt	Schallschutzstufe
TRNSYS	Transient System Simulation Program

TRY	Testreferenzjahr
WDVS	Wärmedämmverbund-System
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe
WRG	Wärmerückgewinnung
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WÜT	Wärmeübertrager

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Zeichen
\dot{q}_K	W/m ²	Wärmestromdichte im Kanalquerschnitt
\dot{q}_w	W/m ²	Wärmestromdichte im Wandquerschnitt
H'_T	W/(m ² K)	Transmissionswärmetransferkoeffizient
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom
\dot{m}	kg/h	Massenstrom
A	m ²	Grundfläche
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
A _{NE}	m ²	Grundfläche der Nutzungseinheit
c	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität
D	dB	Einfügungsdämpfung
d*	m	Gleichwertiger Durchmesser
d _h	m	Hydraulischer Durchmesser
d _r	m	Durchmesser
e _p	-	Anlagenaufwandszahl
e _{win}	-	Windschutzkoeffizient
f	-	Temperaturfaktor
f _{ATD}	-	Faktor zur Berücksichtigung von Außenluftdurchlässen
f _e	-	Faktor zur Bewertung der Infiltration bei mechanischer Lüftung
f _p	-	Primärenergiefaktor
f _{wirk,Komp}	-	Faktor zur Bestimmung lüftungstechnischer Maßnahmen
f _{wirk,Lage}	-	Lagefaktor des Gebäudes
f _{WS}	-	Faktor zur Berücksichtigung des Wärmeschutzes

g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_c	$W/(m^2K)$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
H_R	m	Raumhöhe
l	m	Länge
L_{AFmax}	$dB(A)$	maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel
n_{50}	h^{-1}	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz
n_{inf}	h^{-1}	Infiltrationsluftwechsel
n_{nutz}	h^{-1}	Nutzungsbedingter Mindestaußenluftwechsel
Nu	-	Nußeltzahl
n_{win}	h^{-1}	Fensterluftwechsel
Pa	$kg/(ms^2)$	Druck
P_{el}	W	Elektrische Anschlussleistung
Pr	-	Prandlzahl
Q_{el}	kWh	Hilfsstrombedarf
Q_H	$kWh/(m^2a)$	Spezifischer jährlicher Heizwärmebedarf
Q_I	$kWh/(m^2a)$	Spezifische jährliche interne Wärmegewinne
Q_{loss}	kWh/a	Jährliche Wärmeverluste
Q_S	$kWh/(m^2a)$	Spezifische jährliche solare Wärmegewinne
Q_T	$kWh/(m^2a)$	Spezifische jährliche Transmissionswärmeverluste
q_v	m^3/h	Luftvolumenstrom
Q_V	$kWh/(m^2a)$	Spezifische jährliche Lüftungswärmeverluste
$q_{v,ges,NE,FL}$	m^3/h	Luftvolumenstrom für den Feuchteschutz
$q_{v,inf,wirk}$	m^3/h	wirksamer Luftvolumenstrom durch Infiltration
$Q_{verteilung}$	kWh	Energieverlust über Heizungsverteilung
$Q_{WÜT}$	kWh/a	Jährlich zurückgeführte Wärmeenergie
Re	-	Reynoldszahl
R_w	$(m^2K)/W$	Wärmedurchlasswiderstand
S	m^2	Freie Querschnittsfläche
t_{nutz}	h	Tägliche Nutzungsdauer
$t_{v,mech}$	h	Tägliche Betriebsdauer der Lüftungsanlage
U	m	Umfang

U	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient
w	m/s	Luftgeschwindigkeit
x _{abs}	g/kg	Absolute Luftfeuchtigkeit
z	m	Geodätische Höhe
α	-	Absorptionsgrad
ΔH	W/K	Temperaturspezifischer Wärmeverlust
Δn _{win}	h ⁻¹	Zusätzlicher Fensterluftwechsel
Δn _{win,mech}	h ⁻¹	Zusätzliche Fensterluftwechsel während der Betriebszeit einer mechanischen Lüftungsanlage
Δp	Pa	Druckunterschied
Δp _v	Pa	Druckverlustterm
ΔQ _P	kWh	Primärenergieeinsparung
ε	mm	Rauigkeit
ζ	-	Widerstandsbeiwert
ζ _r	-	Wandreibungs-Widerstandsbeiwert
ζ _u	-	Umlenkungs-Widerstandsbeiwert
η	-	Wirkungsgrad
η _{sys}	-	Systemwirkungsgrad
η _{tot}	-	Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Motor und Antrieb
η _V	-	Ventilatorwirkungsgrad
η _{V,mittel}	-	Mittlerer Ventilatorwirkungsgrad
η _{WT}	-	Wirkungsgrad des Wärmetauschers
θ	K, °C	Temperatur
θ _{Ab}	K, °C	Temperatur der Abluft
θ _{Au}	K, °C	Temperatur der Außenluft
θ _e	K, °C	Außenlufttemperatur
θ _i	K, °C	Innenraumtemperatur
θ _{in}	K, °C	Eintrittstemperatur
θ _{iso,k}	K, °C	Temperatur der anliegenden Isothermen
θ _K	K, °C	Temperatur der Kanalluft
θ _{K,e}	K, °C	Temperatur der äußeren Dämmschichtoberfläche am Kanalprofil

$\theta_{K,i}$	K, °C	Temperatur der inneren Dämmschichtoberfläche am Kanalprofil
$\theta_{OB,K}$	K, °C	Temperatur der äußeren Kanaloberfläche
θ_{out}	K, °C	Austrittstemperatur
θ_{umg}	K, °C	Umgebungstemperatur
$\theta_{W,e}$	K, °C	Temperatur der äußeren Dämmschichtoberfläche am Wandprofil
$\theta_{W,i}$	K, °C	Temperatur der inneren Dämmschichtoberfläche am Wandprofil
θ_{Zu}	K, °C	Temperatur der Zuluft
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
λ_r	-	Reibungszahl
ρ	kg/m ³	Rohdichte
σ_f	-	Standardabweichung
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
φ	%	relative Luftfeuchtigkeit
ψ	W/(mK)	Wärmebrückenverlustkoeffizient
Φ	-	Rückwärmehzahl
$\Phi_{Gerät}$	-	Rückwärmehzahl des Lüftungsgeräts
Φ_{System}	-	Rückwärmehzahl des Lüftungssystems

Kurzfassung

Energieeffiziente und kostengünstige Gebäudesanierungskonzepte können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Sanierungsquote im Wohngebäudebestand zu erhöhen. Dabei spielen neben dem erreichbaren Energieeinsparpotential und den Kosten für die Sanierung auch wohnraumhygienische Aspekte, wie die Sicherstellung des hygienischen Luftwechsels, eine entscheidende Rolle.

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines Sanierungssystems, bei dem die luftführenden Kanäle für ein zentrales Lüftungssystem direkt in der Fassadendämmung integriert sind. Unter Verwendung eines integralen Ansatzes wird in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, um die Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit eines Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung bestimmen und optimieren zu können.

In einem ersten Schritt wird an einem realen Gebäude das Betriebsverhalten des Systems mittels einer messtechnischen Analyse untersucht. Im Anschluss daran wird das strömungstechnische Verhalten der Dämmstoffkanalplatten bestimmt und hydraulisch bewertet. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse, wird das Sanierungssystem mithilfe von thermisch-hydraulisch gekoppelten Gebäudesimulationen gesamtenergetisch analysiert und konventionellen Luftkanalsystemen gegenübergestellt. Das entwickelte Modell wird dazu genutzt, um die Anwendung des Systems auch für den Mehrgeschosswohnungsbau zu ermöglichen und um eine baupraktische Optimierung vorzunehmen.

Abstract

Concepts for building refurbishments which are both energy-efficient and cost-effective can contribute to increase the rate of retrofitting of the residential building stock significantly. In addition to the achievable potential of energy-saving and the cost for the renovation, hygienic indoor conditions, such as ensuring the hygienic air change, are very important.

The objective of this work is the further development of a retrofitting system in which the air ducting for a central residential ventilation system is integrated directly into the façade insulation. Using an integral approach, this work develops a methodology for determining and optimizing the technical functioning and performance of a refurbishment system with façade integrated air ducting.

In a first step, the operating performance of the system on a real building is examined with an analysis of the measurement data. Subsequently, the flow characteristics of the integrated air ducts in the insulation panels is determined and evaluated hydraulically. Based on the knowledge obtained, the refurbishment system is analyzed by thermal-hydraulic coupled building simulations and compared with conventional air duct systems. The developed model can be used to enable the application of the system also for multi-storey buildings and to identify practical improvement.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zuge der politisch beschlossenen Energiewende in Deutschland wird in den nächsten Jahrzehnten, neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien und den dafür benötigten Stromnetzen, der Steigerung der Energieeffizienz des Gebäudebestands eine besonders wichtige Rolle zugewiesen [EU 2010], [Schmid 2010]. Bis zum Jahr 2050 soll das Energieversorgungssystem in Deutschland von derzeit überwiegend fossilen und nuklearen Energieträgern vollständig auf regenerative Energiequellen umgestellt werden.

Gegenwärtig entfallen ca. 40 % des Endenergiebedarfs in der Europäischen Union auf den Gebäudesektor [Täschner 2012] und hiervon ein überwiegender Anteil auf die Beheizung der Gebäude [Dena 2016]. Da die Wärmebereitstellung zu mehr als 70 % über fossile Brennstoffe gedeckt wird [Dena 2016], können durch die Reduzierung des Heizwärmebedarfs dieser Gebäude sowohl Ressourcen als auch die damit einhergehenden CO₂-Emissionen gemindert werden. Erste staatliche Verordnungen zur Energieeinsparung an Gebäuden datieren bereits aus den späten 1970er Jahren. Sie waren eine Reaktion auf die Ölkrise und die rasante Verteuerung des Rohöls. Mit Einführung der Wärmeschutzverordnung [WschV 1977] und deren zweimaliger Novellierung wurden für Neubauten bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs vorgeschrieben. Im Jahr 2002 wurden als nächster Schritt die Anforderungen an bauliche und anlagentechnische Maßnahmen aus Wärmeschutzverordnung und Heizungsanlagen-Verordnung [HeizAnV 1978] in die Energieeinsparverordnung [EnEV 2009] integriert und in den Folgejahren mehrmals novelliert. Neue Energiestandards wie das Passivhaus, ein Gebäude, das aufgrund seines sehr guten baulichen Wärmeschutzes sowie optimierter passiver Solarenergiegewinne auf ein konventionelles Heizsystem verzichten kann oder das Plusenergiehaus, das im Jahresverlauf durch eine große Photovoltaikanlage mehr Energie erzeugt, als es verbraucht, sind technisch ausgereift und haben sich in der Baupraxis bewährt.

Betrachtet man jedoch zahlenmäßig den deutschen Gebäudebestand, so stellt man fest, dass aktuell 68 % des Gebäudeendenergieverbrauchs durch Wohngebäude verursacht wird, die vor 1979, also vor Einführung der 1. Wärmeschutzverordnung, errichtet wurden [Dena 2016]. Diese Gebäude weisen ein besonders großes Energieeinsparpotential auf, da ihre durchschnittlichen Endenergiebedarfe über 200 kWh/m²a betragen. Aus diesem Grund sollte der Fokus verstärkt auf Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung im Bestand gerichtet werden.

Ein wesentlicher Indikator, um den Sanierungsfortschritt in Deutschland zu quantifizieren, ist die energetische Sanierungsrate. Zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis zum Jahr 2050, wie er in den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung verankert ist, sind Maßnahmen erforderlich, die zu einer signifikanten Erhöhung der energetischen Sanierungsrate auf mindestens 2 % pro Jahr führen. Für den Betrachtungszeitraum 2005 bis 2008 wird vom Institut Wohnen und Umwelt eine Gesamtsanierungsrate von 0,8 % pro Jahr angegeben [Diefenbach et al. 2010]. Die derzeitige Entwicklung der Sanierungsbranchen deutet allerdings nicht darauf hin, dass die Zielvorgaben in nächster Zeit erreicht werden können. Laut [Dena 2016]

wächst der Heizungs- und Fenstermarkt nur geringfügig, während die Absatzzahlen für Dämmstoffe im Sanierungsbereich leicht rückläufig sind. Maßnahmen zur energetischen Sanierung müssen nicht nur energieeffizient sein, sondern sich auch in überschaubaren Zeiträumen wieder erwirtschaften lassen. Die Gesetzgebung in Deutschland unterstützt beispielsweise private Investoren mit zinsgünstigen Darlehen der KfW-Bankengruppe. Für selbstgenutzte Wohngebäude ist eine Wirtschaftlichkeit von energetischen Modernisierungen mit den derzeit verfügbaren Förderkrediten und den bauüblichen Sanierungsverfahren bereits zu erreichen, wenn auch über einen unverhältnismäßig langen Zeitraum [Stolte et al. 2011].

1.2 Problemstellung

Umfassende Sanierungen im Gebäudebestand scheitern oft an den hohen Kosten, sodass häufig nur kleinteilige Sanierungsmaßnahmen oder Einzelmaßnahmen, wie der Austausch des Wärmeerzeugers oder kleine Instandsetzungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, vorgenommen werden. Diese sind wenig effizient und sorgen dafür, dass auf unbestimmte Zeit keine weiteren Änderungen am Gebäude durchgeführt werden. Der jährliche Energiebedarf bestehender Wohngebäude kann durch Sanierungsmaßnahmen, die in den gesetzlichen Anforderungen verankert sind, bereits erheblich gesenkt werden. Diese Einsparungen resultieren überwiegend aus Maßnahmen zur Minderung der Transmissionswärmeverluste, wie der Dämmung der Außenwandflächen und dem Austausch der bestehenden Fenster. Durch sorgfältige Planung und logistische Abstimmung der Gewerke (Stuckateur-, Fensterbauer- und Malerbetrieb) lassen sich diese Arbeiten auch im Bereich der Bauteilanschlüsse bauphysikalisch zufriedenstellend lösen. Die Lüftungswärmeverluste bleiben jedoch nach der Sanierung der Gebäudehülle nahezu gleich und steigen sogar anteilig an den Gesamtwärmeverlusten. Eine weitere Verringerung des Energiebedarfs erfordert daher eine stärkere Fokussierung auf die Senkung der Lüftungswärmeverluste, wie beispielsweise durch den Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Des Weiteren kann die erhöhte Dichtigkeit der Außenfassaden nach der energetischen Modernisierung aufgrund von falscher oder unzureichender Lüftung zu feuchtetechnischen Problemen wie Tauwasserausfall im Bereich der Fenster führen.

Zur Sicherstellung eines hygienischen Mindestluftwechsels einschließlich der Vermeidung von Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung liefert das Normenwerk [DIN 1946-6] Hinweise zur Bemessung und Ausführung von Lüftungssystemen sowie der Erstellung eines Lüftungskonzepts. Für Neubauten ist ein Lüftungskonzept prinzipiell erforderlich. Speziell bei Bestandsgebäuden sind Lüftungstechnische Maßnahmen dann notwendig, wenn der notwendige Luftvolumenstrom zum Feuchteschutz den Luftvolumenstrom durch Infiltration in einer Wohnung aufgrund lüftungsrelevanter Modernisierungsmaßnahmen, wie dem Austausch alter Fenster und der Abdichtung des Daches, übersteigt. Lüftungstechnische Maßnahmen können als freie Lüftung mit Schacht- oder Querlüftungssystemen oder als ventilatorgestützte Lüftung mit Lüftungsanlagen realisiert werden. Mechanische Wohnungslüftungsanlagen bieten gegenüber der freien Lüftung den Vorteil, dass sie unabhängig vom anliegenden Temperatur- und Druckpotential am Gebäude entweder nutzerunabhängig oder auf die Raumnutzung angepasst den geforderten Luftwechsel sicherstellen können. Schacht- und Querlüftungssysteme funktionieren zwar innerhalb der Heizperiode bei tiefen Außentemperaturen am effektivsten, führen jedoch zu unangemessen hohen Wärmeverlusten. Zentrale Wohnungslüftungsanlagen

mit Wärmerückgewinnung bieten dagegen neben der Bereitstellung einer ausreichenden Frischluftmenge weitere Vorteile. Sie vermeiden hohe Raumlufffeuchten und minimieren das damit einhergehende Risiko von Schimmelpilzbildung an kälteren Oberflächen. Gerüche und Schadstoffe werden zuverlässig aus den Räumen abgeführt. Aufgrund der Wärmerückgewinnung führt der Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung zu deutlich reduzierten Lüftungswärmeverlusten und damit zu einer weiteren Heizwärmeeinsparung.

Die nachträgliche Installation einer solchen Lüftungsanlage im Innenbereich ist jedoch zeitaufwendig und kostenintensiv, weil einzelne Kanäle sowohl im Raum als auch zwischen den Geschossen verlegt werden müssen. Häufig stößt der Einbau auf bauliche Probleme, da geringe Raumhöhen insbesondere bei Nachkriegsgebäuden das notwendige Kanalleitungssystem nicht zulassen. Auch Deckendurchbrüche und die Anschlüsse an das Lüftungsgerät gestalten sich oft schwierig. Darüber hinaus führen Lärm und der anfallende Schmutz während der Installationszeiten zu starken Beeinträchtigungen der Bewohner. Aufgrund dieser Sanierungshemmnisse wird daher meist auf den Einsatz zentraler Lüftungsanlagen verzichtet und stattdessen werden dezentrale Lüftungsgeräte oder reine Abluftsysteme eingesetzt, die allerdings aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung nicht annähernd so effizient wie zentrale Systeme sind.

Ein wichtiges Forschungs- und Entwicklungsziel stellen daher energieeffiziente Sanierungslösungen für den Gebäudebestand dar, die nicht nur ein hohes Energieeinsparpotential versprechen, sondern auch kostengünstig sind und zudem wohnraumhygienische Aspekte, wie die Sicherstellung des hygienischen Luftwechsels, beinhalten.

1.3 Lösungsansatz mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen

Das innenliegende Luftverteilungssystem für zentrale Wohnungslüftungsanlagen ist im Gebäudebestand im bewohnten Zustand oft nur mit unangemessen hohem Aufwand zu realisieren. Eine mögliche Lösung besteht darin, das Luftkanalnetz für die Luftverteilung in der Fassade herzustellen. Da schon für die Montage des Wärmedämmverbund-Systems (WDVS) ein Gerüst benötigt wird, können die notwendigen Arbeiten für die Ausbildung des Kanalnetzes von außen durchgeführt werden. Der Zugang zu den einzelnen Wohneinheiten ist nur beim Anschluss der Luftkanäle an die jeweiligen Räume erforderlich. Für die Installation der Lüftungsleitungen bieten sich grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen an. Bei der zweilagigen Verlegung werden die Kanäle in einem ersten Schritt zunächst an der Fassade befestigt und luftdicht miteinander verbunden und anschließend mit einem herkömmlichen WDVS überdeckt.

Der weitaus einfachere Ansatz, der in dieser Arbeit wissenschaftlich analysiert und weiterentwickelt wird, sieht vor, die luftführenden Kanäle für ein zentrales Lüftungssystem direkt in die anzubringende Außendämmung zu integrieren. Die Funktionen Wärmedämmung und Luftkanalführung sind somit in einer Funktion vereint und können durch den Mehrfachnutzen der einlagigen Montage zu einem kostengünstigeren Fassadensanierungssystem führen. Ein derartiges System wurde bereits in der Literatur [Hauser und Kaiser 2013], [Hauser 2008], [Ziegler 2010] beschrieben und an einem Demonstrationsobjekt umgesetzt. Die luftführenden Kanaldämmplatten bestehen aus EPS-Hartschaum, sie werden auf Versatz an der Fassade verklebt und ergeben im eingebauten Zustand den fertigen Luftkanal (siehe Abb. 1, Abb. 2 und

Abb. 3). Der Anschluss des Lüftungskanals ist mit einem Nut-und-Feder-System ausgebildet, um eine bessere Dichtung und maßhaltigere Verlegung zu gewährleisten. Mit Kernbohrungen durch die Außenwand werden die dämmstoffintegrierten Luftkanäle mit den einzelnen Räumen des Gebäudes verbunden (siehe Abb. 4). Die Kanalgeometrie weist einen freien Querschnitt von 30 mm x 300 mm auf und ist aus Stabilitätsgründen durch einen senkrechten Steg getrennt.



Abb. 1: Wärmedämmplatte mit Lüftungskanal¹



Abb. 2: Kanalführung an einem Wohngebäude²



Abb. 3: Verarbeitung der Wärmedämmplatten an einem Gebäude in Tegernsee³



Abb. 4: Kernbohrung (links) und Einsetzen des Tellerventils zum Anschluss des Luftkanals an den Raum (rechts)

Ein System mit integrierter Luftführung in der Fassadendämmung verspricht neben der Senkung des Heizwärmebedarfs durch das Wärmedämmverbund-System ein zusätzliches Energieeinsparpotential durch verringerte Lüftungswärmeverluste und kann durch den Kostenvorteil dafür sorgen, die Sanierungstiefe bei Altbausanierungen in Deutschland zu erhöhen. Aufgrund des neuartigen Ansatzes sind umfangreiche Untersuchungen und Weiterentwicklungen notwendig, um den Einsatz eines derartigen Systems für umfassende Gebäudesanierungen zu ermöglichen.

¹ Fotograf: Paavo Blofield <http://www.blofield.de>

² Grafik: Jan Kaiser, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Kassel

³ Foto von Prof. Dr. Holm zur Verfügung gestellt

Für das oben dargestellte System wurden die erreichbaren Energieeinsparpotentiale bislang noch nicht in einer gesamtenergetischen Bilanzierung ermittelt. Dies ist jedoch notwendig, um die Gesamteffizienz im Vergleich zu herkömmlichen Sanierungslösungen bewerten zu können. Die strömungstechnische Verteilung und die Druckverluste in den fassadenintegrierten Luftkanälen sind darüber hinaus noch weitestgehend unbekannt. Durch die messtechnische Bestimmung der Druckverluste und die Optimierung der Leitungsführung auf der Fassade können Systemgrenzen aufgezeigt und die Luftkanalführung für eine Vielzahl von Gebäudeanwendungen ermöglicht werden. Für den baupraktischen Einsatz und die Weiterentwicklung zu einem marktfähigen Produkt müssen schließlich hygienische Aspekte geklärt werden, die auch die Fragestellung des Tauwasserausfalls im Kanal sowie die Möglichkeit der Reinigung des Luftleitungssystems beinhalten. Die Bearbeitung brandschutztechnischer Aspekte ist für die Zulassung als Sanierungssystem wichtig, um beispielsweise eine Rauch- und Brandweiterleitung im Luftkanal auf nächstgelegene Geschosse zu vermeiden. Daran anschließend müssen noch konstruktive Anschlussdetails entwickelt werden, um eine einfache und strömungstechnisch wirkungsvolle Lufteinbringung in das Gebäude zu garantieren.

1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines neuartigen Sanierungssystems, bei dem die Funktionen Wärmedämmung und Luftkanalführung in einer Konstruktion vereint sind. Eine solche kostengünstige und robuste Sanierungslösung bei gleichzeitiger hoher Energieeffizienz ist äußerst vielversprechend, um eine Steigerung der Sanierungsquote im Altbaubestand erreichen zu können. Der neuartige Ansatz mit fassadenintegrierter Luftkanalführung wurde erstmals an einem Wohngebäude getestet, allerdings sind wesentliche Eigenschaften zur Funktionsweise und Leistungsfähigkeit bislang weitestgehend unbekannt.

Im Rahmen dieser Dissertation wird das Sanierungssystem hinsichtlich aller lüftungstechnisch relevanter Aspekte wissenschaftlich fundiert untersucht und verbessert. Der dafür ausgewählte integrale Ansatz sieht deshalb eine umfassende Betrachtung aller wesentlichen Fragestellungen vor. Diese betreffen neben den energetischen Aspekten, wie das wärmetechnische Verhalten der Luftleitungen durch die Lage innerhalb der Dämmschicht, auch die hydraulischen Eigenschaften der Kanäle. Durch die erstmalige Bestimmung der Druckverluste der dämmstoffintegrierten Kanäle und die Verbesserung der lufttechnischen Auslegung kann der Hilfsenergieeinsatz des Gesamtsystems optimiert werden. Brandschutztechnische Aspekte werden in dieser Arbeit ebenfalls intensiv analysiert und passende Lösungen für unterschiedliche Gebäudeanwendungen ausgearbeitet. Weitere wichtige Fragestellungen bezüglich der Weiterentwicklung des Sanierungssystems sind die Hygiene und Inspektion der Lüftungsleitungen.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Sanierungslösung mit integrierter Luftkanalführung werden zunächst normative Anforderungen und Kriterien in technischen Regelwerken auf den innovativen Ansatz hin übertragen und anschließend bekannte Verfahren und Methoden identifiziert, die für die Beurteilung und Vergleichbarkeit des innovativen Systemansatzes mit konventionellen Lüftungssanierungen notwendig sind. Mithilfe dieser Methoden wird dann eine Bewertung des Systems in Form von geeigneten Kennwerten für Komponenten des Luftkanalnetzes und der energetischen Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems vorgenommen. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen dieser Arbeit werden danach durch Anpassung der

Systemparameter eine baupraktische Optimierung durchgeführt und Planungsempfehlungen entwickelt. Damit ist es schließlich möglich, das innovative Sanierungssystem für eine Vielzahl von Wohngebäuden unterschiedlicher Bauart und Größe zu realisieren.

Vorgehensweise

Das Forschungsdesign der Dissertation, das sich aus der oben beschriebenen Zielsetzung ableitet, wird in der nachstehenden Abb. 5 veranschaulicht. Die einzelnen Gliederungspunkte finden sich auch in der Kapitelstruktur wieder. Der wissenschaftliche Kern dieser Arbeit setzt sich aus den folgenden drei Methoden zusammen: der messtechnischen Analyse an einem Testgebäude, der hydraulischen Bewertung durch experimentelle Untersuchungen an den Dämmstoffkanalplatten und der gesamtenergetischen Bilanzierung über eine thermisch-hydraulisch gekoppelte Gebäudesimulation. Diese drei methodischen Schwerpunkte bauen nicht nur aufeinander auf, sondern stehen auch in Abhängigkeit zueinander.

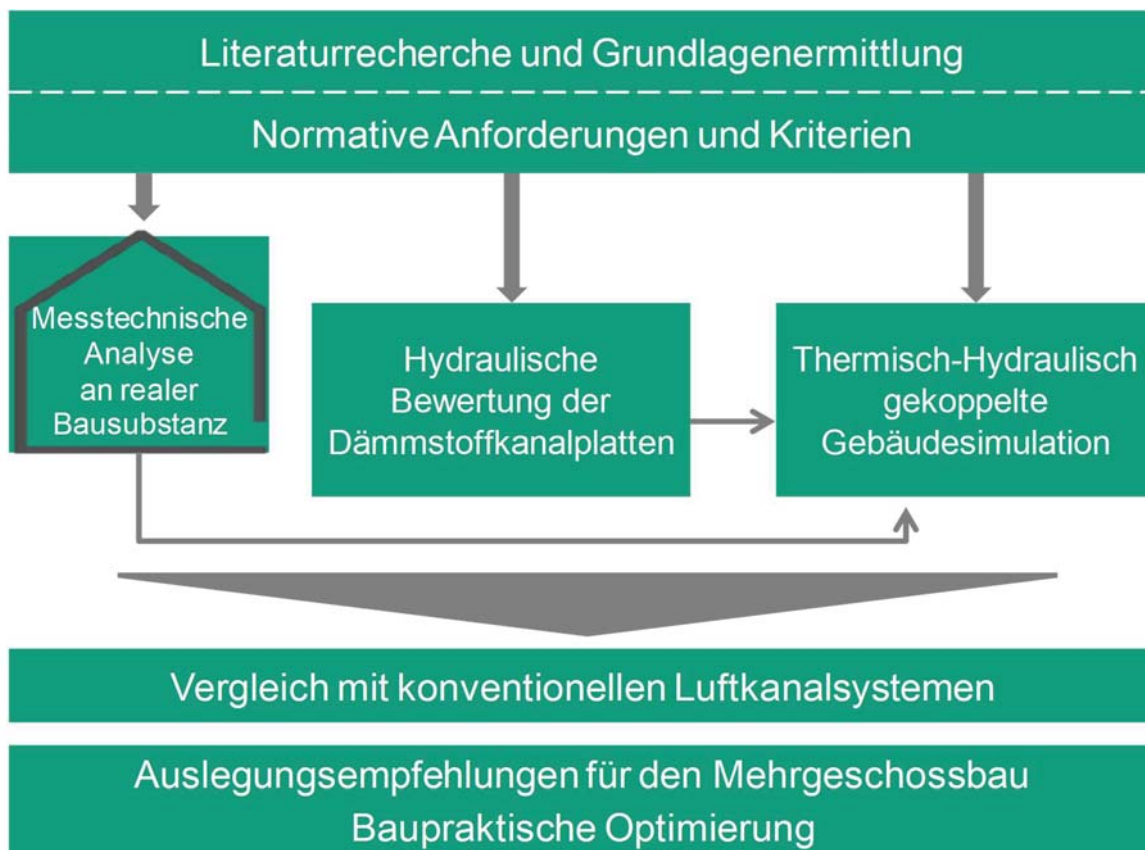


Abb. 5: Struktur der Dissertation

Zu Beginn dieser Arbeit werden die Voraussetzungen und Anforderungen von Sanierungssystemen ermittelt, bei denen eine Integration der Luftkanalführung über die Fassade realisiert werden kann. Zunächst wird auf die Aufgaben der Raumlüftung und die Berücksichtigung des Luftwechsels in Rechen- und Bilanzierungsverfahren sowie der verordnungstechnischen Beweisführung eingegangen. Insbesondere die Bemessung und Ausführung lüftungstechnischer Maßnahmen nach [DIN 1946-6] ist hier von Bedeutung. Dazu werden die unterschiedlichen verfügbaren Lüftungssysteme für den Einsatz im Gebäudebestand charakterisiert und gegenübergestellt sowie die Kriterien und Auslegungsempfehlungen für mechanische Lüftungssysteme in Normen und technischen Regelwerken um die Anforderungen für Systeme mit

fassadenintegrierter Luftkanalführung ergänzt. Dies betrifft unter anderem energetische, hydraulische, akustische, hygienische und brandschutztechnische Aspekte.

Im Rahmen eines industriellen Forschungsprojekts wurde ein Demonstrationsgebäude mit einem Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung saniert und das Betriebsverhalten mithilfe eines umfangreichen Monitoringsystems erfasst. Innerhalb dieser Arbeit werden diese Langzeitmessungen über mehrere Jahre ausgewertet und analysiert, um Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung treffen zu können. Auf Basis der daraus erzielten Erkenntnisse können dann Weiterentwicklungen für weitere Anwendungen des Systems im Wohngebäudebestand abgeleitet werden. Aus diesem Grund werden am Gebäude der Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage einschließlich der Luftkanalführung in der Fassade bestimmt und der zusätzliche thermische Energieverlust, der sich durch die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle einstellt, quantifiziert. Zur Beurteilung des Hilfsstromverbrauchs wird außerdem die elektrische Leistungsaufnahme zur Luftförderung bei unterschiedlichen Lüftungsstufen analysiert und bewertet.

Die hygienischen Eigenschaften des neuartigen Systems hängen zum einen mit den Verschmutzungseigenschaften des Kanalnetzes und deren Reinigungsmöglichkeiten und zum anderen mit der Vermeidung einer möglichen Tauwasserbildung im Kanal zusammen. Zur Beurteilung der hygienischen Bedingungen wird an ausgewählten Stellen im Luftkanalnetz die relative Luftfeuchtigkeit messtechnisch ermittelt und praktische Lösungen für die Inspektion der Luftkanalführung erarbeitet.

Die strömungstechnische Ausführung des Kanalnetzes und die Dimensionierung der Leitungsführung spielen sowohl für die Berechnung der Systemdruckverluste wie auch für die hydraulische Luftverteilung in den Räumen des Gebäudes eine wesentliche Rolle. Das hydraulische Verhalten der fassadenintegrierten Luftkanalführung ist bislang weitestgehend unbekannt. Mithilfe von detaillierten experimentellen Untersuchungen im Labor wird der aktuelle Wissensstand diesbezüglich erweitert. Dazu wird ein Messverfahren vorgestellt, mit dem der Druckverlust der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und ausgewählter Anschlussstücke im Kanalnetz erstmals ermittelt werden kann. Damit ist es möglich, für die Ausführung der Eintrittsöffnung in den Raum im Bereich der Außenwand einen strömungstechnischen Kennwert zu bestimmen und die Luftkanalführung über die Fassade hydraulisch zu bewerten. Zudem bieten die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen eine Hilfestellung für die Auslegung der Ventilatoren und die Dimensionierung der Lüftungsanlage.

Der Anschluss der Kanaldämmplatten, die im eingebauten Zustand den Luftkanal bilden, muss luftdicht hergestellt werden. Die messtechnische Bestimmung der Leckagevolumenströme bei unterschiedlichen Abdichtungsmaßnahmen liefert wichtige Erkenntnisse für zukünftige baupraktische Ausführungen.

Ausgehend von den Erkenntnissen der messtechnischen Analyse und den hydraulischen Untersuchungen im Labor wird nun ein Simulationsmodell für das Sanierungssystem mit fassadenintegrierten Lüftungskanälen entwickelt. Ziel ist es, das thermische und energetische Verhalten eines Gebäudes mit zentralem Lüftungssystem und dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen anhand von dynamischen Gebäude- und Systemsimulationen zu analysieren und zu bewerten. Außerdem stellt das entwickelte Modell ein Werkzeug dar, um erstmals die

Energieeinsparung über das neuartige Lüftungssystem in einer gesamtenergetischen Jahresbilanz unter standardisierten Randbedingungen beurteilen zu können. Somit ist auch ein Vergleich zu konventionellen Lüftungssystemen möglich. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle werden über ein instationäres Durchflussmodell in der Simulation abgebildet und dessen thermisches Verhalten wird anhand realer Messdaten überprüft. Der Einfluss der äußeren klimatischen Randbedingungen auf die hydraulische Luftverteilung im Gebäude wird mit einem dynamischen Luftströmungsmodell berechnet und mit dem thermischen Modell in einer gekoppelten Simulation parallel analysiert. Die Ergebnisse der hydraulischen Laboruntersuchungen und die daraus gewonnenen Druckverlustkennwerte fließen dabei in die Berechnung mit ein. Hierfür wird ergänzend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Abhängigkeit verschiedener Parameter auf die Luftverteilung und den Energiebedarf des Gebäudes zu erhalten.

Die Anwendung des innovativen Sanierungssystems für unterschiedliche Wohngebäudeklassen wird anhand einer Potentialanalyse geprüft und die Hemmnisse und baulichen Abhängigkeiten, die sich aus der Grundriss- und Fassadengestaltung der Gebäude ergeben, herausgearbeitet. Je nach Gebäudeklasse des zu sanierenden Wohngebäudes müssen unterschiedliche Anforderungen an den Brandschutz berücksichtigt werden. Bei der Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten und Planungsempfehlungen für die Luftkanalführung über die Fassade müssen entsprechende brandschutztechnische Maßnahmen jeweils in die Sanierungskonzepte mit einbezogen werden. Dies bezieht sich insbesondere auf Außenwanddurchdringungen und die Vermeidung von Rauch- und Brandweiterleitung in benachbarte Geschosse.

Die aus den konzeptionellen Untersuchungen abgeleiteten Lösungen für die Leitungsführung für ein zentrales Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung werden an verschiedenen Gebäuden, einem freistehenden Gebäude der Gebäudeklasse 1 und an einem größeren Mehrfamilienhaus, angewendet und einem herkömmlichen Lüftungssystem mit innenliegenden Lüftungsleitungen energetisch und hydraulisch gegenübergestellt. Aus den Ergebnissen der oben beschriebenen Untersuchungen erfolgt in einem letzten Schritt schließlich eine baupraktische Optimierung und Weiterentwicklung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung für eine breite Anwendung im Wohngebäudebestand.

2 Technische Grundlagen zur Lüftung von Gebäuden

In diesem Kapitel werden die technischen Funktionen der Lüftung in Gebäuden erläutert. Dazu werden zunächst die Kenngrößen für den Luftwechsel in Normen und technischen Regelwerken dargestellt und im Anschluss daran die verschiedenen Lüftungssysteme charakterisiert und beschrieben. Ziel der technischen Grundlagen ist es aus den Kriterien und Anforderungen für mechanische Lüftungssysteme diejenigen Aspekte zu bewerten, die für den neuartigen Ansatz der fassadenintegrierten Luftkanalführung relevant sind.

2.1 Lüftung in Gebäuden

Lüftungssysteme in Gebäuden haben die Aufgabe, durch die Sicherstellung eines ausreichenden Luftwechsels ein behagliches Raumklima zu bewahren [Häupl et al. 2013]. Der Luftaustausch ist insbesondere zur Abfuhr von anfallendem Wasserdampf, Schadstoffen, Gerüchen und weiteren Luftbelastungen notwendig, die in Innenräumen durch die anwesenden Personen, Emissionen aus Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen sowie die Nutzung des Gebäudes entstehen [RWE 2010]. Des Weiteren ist aus bauphysikalischen Gründen ein Mindestluftwechsel erforderlich, um feuchtetechnische Bauschäden durch auftretendes Tauwasser und Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen und -anschlüssen vorzubeugen.

2.1.1 Kenngrößen der Lüftung

Ein Maß für den Luftaustausch in Räumen ist die Luftwechselrate (in h^{-1}). Sie gibt an, wie oft das gesamte Raumvolumen pro Stunde durch Außenluft getauscht wird [DIN EN 12792]. Ein Großteil der Bestandsgebäude wird über natürliche Lüftung mit Frischluft versorgt. Dies bedeutet, der Luftwechsel ergibt sich zum einen durch Infiltration, also dem unkontrollierten Luftaustausch über Fensterfugen und Undichtigkeiten der Gebäudehülle, und zum anderen gezielt durch das Öffnen von Fenstern oder Türen. Die natürliche Lüftung hängt von vielen, zum Teil instationären Einflussfaktoren ab, wie beispielsweise den meteorologischen Bedingungen, der Art der Baukonstruktion, der baulichen Ausführung und insbesondere dem Nutzerverhalten [Maas 1995].

Eine rechnerische Bestimmung des Fensterluftwechsels wurde bereits in [Dascalaki et al. 1995] und [Seifert et al. 2003] untersucht, ebenso wie eine messtechnische Quantifizierung der Fensterlüftung mithilfe der Tracer-Gas-Methode [Maas 1995]. Dabei kann über den zeitlichen Abklingvorgang einer Spurengaskonzentration im Prüfraum indirekt der Luftwechsel angegeben werden. Der Luftaustausch durch Undichtigkeiten, wie Tür- und Fensterfugen, kann mit Prüfkörpern im Labor bei einem Prüfdruck von 100 Pa ermittelt werden. Als Kennwert erhält man den Fugendurchlasskoeffizienten, welcher nach [DIN EN 12207] klassifiziert und bewertet wird. Um jedoch die Luftdichtheit von Wohneinheiten und Gebäuden zu beurteilen, wird ein Differenzdruckmessverfahren nach [DIN EN 13829] eingesetzt, der sogenannte Blower-Door-Test. Der dadurch bestimmte n_{50} -Wert entspricht der Luftwechselrate bei einem Differenzdruck von 50 Pa. Für Neubauten mit Nachweis der Luftdichtheit muss nach [EnEV 2009] ein Anforderungswert von $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ bzw. für neu zu errichtende Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen ein Wert von $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ eingehalten werden. Die Qualitätskriterien an Passivhäusern sehen einen gemessenen Leckagewert von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ vor [Passivhaus Institut 2014]. In einer umfassenden Feldstudie mit 80 Gebäuden wurde für den Altbaubestand ein mittlerer n_{50} -Wert

von $7,4 \text{ h}^{-1}$ gemessen. Der über die Tracer-Gas-Methode bestimmte, mittlere natürliche Luftwechsel dieser Gebäude lag bei $0,26 \text{ h}^{-1}$ [Münzenberg et al. 2003].

Die hohen Infiltrationsluftwechsel bei unsanierten Gebäuden resultieren in erster Linie aus undichten Fenstern und den Leckagen an Bauteilanschlüssen. Nach [Diefenbach et al. 2010] sind etwa 56 % der Außenfenster im deutschen Wohngebäudebestand 20 Jahre alt oder älter. Dies bedeutet, dass in einem absehbaren Zeitraum ein Ersatz dieser Bauteile anstehen wird. Der Austausch der alten Fenster wird bei sanierten Gebäudefassaden zu einem deutlich geringeren Infiltrationsluftwechsel führen. Nach [Trogisch 2011] haben sich zudem in den letzten Jahrzehnten „die Nutzung von Räumen, deren bautechnische Ausgestaltung und die Lüftungsmöglichkeiten“ entscheidend verändert. Dies kann nach [Trogisch 2005] an einigen Beispielen belegt werden. So werden Wohnungstüren und insbesondere Außenfenster aufgrund der gestiegenen Anforderungen an den akustischen Komfort zunehmend dicht gestaltet. Fehlende Trockenräume sorgen für eine höhere Feuchtebelastung in den einzelnen Wohneinheiten und die kontrollierte und bewusste Fensterlüftung kann heutzutage vom Nutzer nicht vorausgesetzt werden.

Die Sicherstellung eines ausreichenden Mindestluftwechsels zur Bewahrung eines behaglichen und hygienisch unbedenklichen Innenraumklimas gewinnt somit immer mehr an Bedeutung und steht teilweise auch im Gegensatz zur Forderung nach Energieeinsparung. Insbesondere die relativ zu den Gesamtwärmeverlusten steigenden Anteile der Lüftungswärmeverluste bei hochwärmedämmten Gebäuden führen zu der Frage, wie die Belüftung dieser Gebäude energieeffizient und möglichst nutzerunabhängig zu konzipieren ist, ohne die Anforderungswerte an den Mindestluftwechsel zu unterschreiten. Die derzeit untersuchten Konzepte beschäftigen sich größtenteils mit Wärmerückgewinnungssystemen mit effizienter Förder- und Verteiltechnik sowie Bedarfslüftungssystemen, die jeweils an die Anwesenheit der Personen bzw. die Nutzung der Räume angepasste Luftmengen bereitstellen.

2.1.2 Dimensionierungsansätze für den Luftwechsel

Die Berechnungsvorschriften für die Luftwechselrate in Gebäuden in einschlägigen Normen, technischen Regelwerken und Rechenverfahren unterscheiden sich teils beträchtlich [Häupl et al. 2013]. So werden neben Luftwechselzahlen auch personenspezifische Luftmengen, beispielsweise für Arbeitsstätten [ASR 2012], und Außenluftvolumenströme für verschiedene Nutzungen [DIN V 18599-10] genannt. Andere Normen beschäftigen sich speziell mit der Konzeptionierung von Lüftungs- und Klimaanlage für Nichtwohngebäude [DIN EN 13779] sowie deren energieeffizienten Betrieb. Im Folgenden wird ausschließlich auf Auslegungswerte für Wohngebäude eingegangen.

Die Berücksichtigung der Luftwechselrate zur Bestimmung der Lüftungswärmeverluste im Nachweisverfahren der Energieeinsparverordnung für Wohngebäude kann über zwei verschiedene Rechenmethoden erfolgen. Im Rechenverfahren nach [DIN 1946-6] wird für freie Lüftung je nach Luftdichtheit eine Luftwechselrate von $0,6\text{-}0,7 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Der Luftwechsel für raumlufttechnische Anlagen wird für Abluftanlagen mit $0,55 \text{ h}^{-1}$ und für Zu- und Abluftanlagen mit $0,6 \text{ h}^{-1}$ angegeben [Hegner und Vogler 2002]. Die nutzungsbedingten Mindestaußenluftwechsel für Wohngebäude gemäß [DIN V 18599-10] sind mit $0,45 \text{ h}^{-1}$ für bedarfsgeführte Systeme und

0,5 h⁻¹ für nicht bedarfsgeführte Systeme anzusetzen. In [DIN EN 15251] werden Auslegungslüftungsraten für Wohngebäude genannt, die in drei verschiedene Kategorien unterteilt sind. Die Höhe der angegebenen Luftwechsel richtet sich nach der Schutzbedürftigkeit der im Raum befindlichen Personen. So gelten für Wohnräume, in denen sich Personen mit Behinderung, kranke Personen oder kleine Kinder befinden, die höchsten Lüftungsraten. Für neue und renovierte Gebäude wird nach Kategorie II eine Luftwechselrate von $n=0,6 \text{ h}^{-1}$ vorgeschlagen.

2.1.3 Lüftungstechnische Maßnahmen nach DIN 1946-6

Deutlich detailliertere Auslegungs- und Dimensionierungsregeln für die Bestimmung des Gesamtaußenluftvolumenstroms für Wohngebäude werden in [DIN 1946-6] vorgestellt. Diese Norm befasst sich mit der Planung, Bemessung und Ausführung von Lüftungssystemen für Wohnungen. Die Notwendigkeit lüftungstechnischer Maßnahmen für ein Gebäude wird durch das Aufstellen eines Lüftungskonzepts geprüft und die erforderlichen Lüftungssysteme werden über ein Ablaufschema konzipiert. Ein Lüftungskonzept ist generell für Neubauten zu erstellen, wie auch für Bestandsgebäude, an denen lüftungsrelevante Änderungen vorgenommen werden. Für zu modernisierende Gebäude ist dies der Fall, wenn mindestens ein Drittel der Außenfenster ersetzt oder eine Dachfläche erneuert wird, sodass sich die Luftdichtheit des Gebäudes deutlich erhöht. Übersteigt hierbei der erforderliche Luftvolumenstrom zum Feuchteschutz je Nutzungseinheit den Infiltrationsluftvolumenstrom, so sind lüftungstechnische Maßnahmen notwendig, die entweder in Form einer freien oder einer ventilatorgestützten Lüftung ausgeführt werden können. Sollten an das zu installierende Lüftungssystem erhöhte Anforderungen bezüglich der Raumluftqualität, der Energieeffizienz oder des Schallschutzes gestellt werden, so können freie Lüftungssysteme, wie Quer- oder Schachtlüftungen, nicht angewendet werden und es sind ventilatorgestützte Systeme zu wählen.

Die Norm definiert verschiedene Lüftungsstufen, die mit der Lüftungsmaßnahme zur Erfüllung bestimmter Aufgaben sichergestellt werden müssen. Im Folgenden werden die Lüftungsbetriebsstufen kurz beschrieben und charakterisiert. Die *Lüftung zum Feuchteschutz* ist abhängig vom Dämmstandard des Gebäudes und dient zur Sicherstellung des Bautenschutzes, um feuchtetechnische Schäden zu vermeiden. Mit der *Reduzierten Lüftung* wird der hygienische Mindestluftwechsel eingehalten. Diese Betriebsstufe beinhaltet die notwendige Luftwechselrate zum Bautenschutz bei teilweise reduzierten Feuchte- und Stofflasten. Die *Nennlüftung* stellt den Normalbetrieb einer Lüftungsanlage bei Anwesenheit der Nutzer dar und dient der Sicherstellung der hygienischen Erfordernisse. Für den schnellen Abbau kurzzeitiger Lastspitzen mit erhöhtem Luftvolumenstrom sorgt die *Intensivlüftung*.

Zur Festlegung der Luftvolumenströme der lüftungstechnischen Maßnahme wird zum einen der Außenluftvolumenstrom über die Nutzfläche der Nutzungseinheit bestimmt und zum anderen die Summe der Abluftvolumenströme der einzelnen Räume ermittelt. Maßgeblich für die Auslegung des Lüftungssystems ist dann, nach Abzug des Infiltrationsanteils, der höhere der beiden Tabellenwerte. Die resultierenden Luftwechselraten für die verschiedenen Lüftungsbetriebsstufen in Abhängigkeit der Nutzfläche und der Infiltrationsluftwechsel sind nach [Heinz 2009] in Abb. 6 dargestellt.

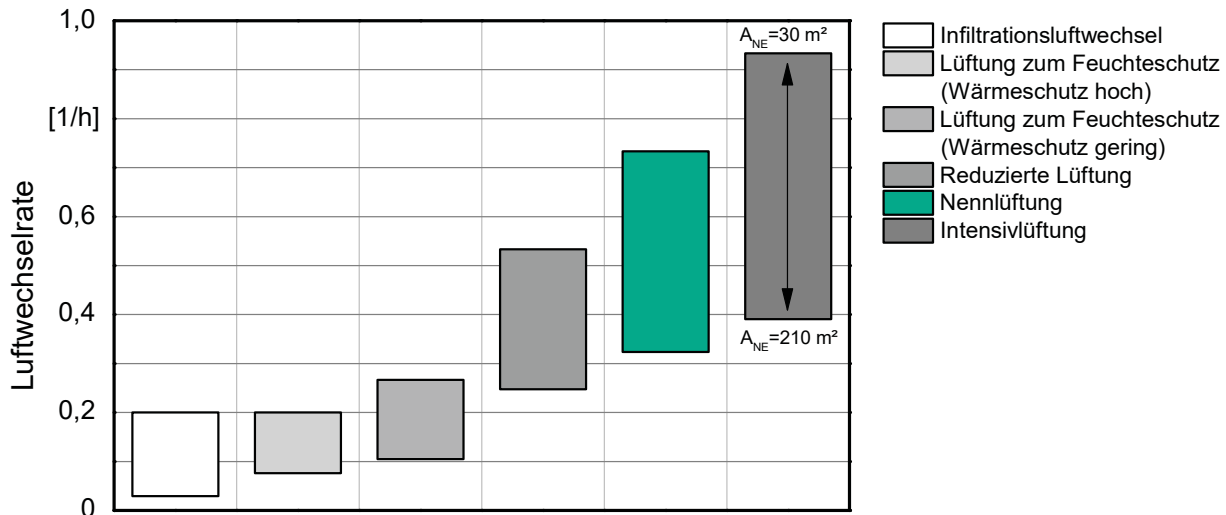


Abb. 6: Notwendige Außenluftwechselraten entsprechend der Lüftungsbetriebsstufen gemäß [DIN 1946-6] Tabelle 5 und Infiltrationsluftwechsel für verschieden große Nutzungseinheiten

Zur nutzerunabhängigen Sicherstellung der oben genannten Lüftungsstufen bieten sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten von Lüftungssystemen an: die kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung oder bedarfsgeführte Lüftungssysteme.

Eine kontrollierte Wohnungslüftung versorgt alle Räume über ein zentrales Lüftungsgerät mit Zuluft- und Abluftventilator und einem getrennten Zu- und Abluftkanalnetz. Die Dosierung der Volumenströme erfolgt entweder über die Stellung von Tellerventilen am Ein- bzw. Auslass der Räume oder über Luftklappen, mit denen der Luftdurchlass geregelt wird. In aktuellen Forschungsprojekten wurde auch bereits der Einsatz dezentraler Ventilatoren in zentralen raumlufttechnischen Anlagen untersucht, die, ähnlich wie Mikropumpen in der Heizungstechnik, einzelne Lüftungsbereiche versorgen [Alsen et al. 2013], [Alsen 2017], [Klimmt 2018].

Eine Bedarfslüftung hat zunächst das Ziel, einen hygienischen Mindestluftwechsel in den einzelnen Lüftungsabschnitten sicherzustellen, wobei im Gegensatz zur kontrollierten Wohnungslüftung nicht zwangsweise eine Wärmerückgewinnung verwendet wird. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Auswahl der Führungsgröße, nach der die Luftmengen in den jeweiligen Räumen eingestellt werden, wie beispielsweise die Präsenz der Bewohner, die Feuchte- oder CO_2 -Konzentration im Raum. In [Richter und Hartmann 2001] wird die Raumlufffeuchte zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung als geeignete Beurteilungsgröße für Wohngebäude identifiziert, da sie sowohl maßgeblich für das Wohlbefinden der Nutzer als auch für die Schadensfreiheit des Gebäudes ist.

2.2 Lüftungssysteme im Gebäudebestand

Ein überwiegender Teil der Bestandsgebäude wird über Fensterlüftung mit Frischluft versorgt. Der Anteil von Lüftungsanlagen in Altbauten beträgt nach [Diefenbach et al. 2010] lediglich 1,5 % und in Neubauten ab dem Baujahr 2005 ca. 10 %. Lüftungssysteme für die energetische Modernisierung müssen in erster Linie einfach und robust sein und die notwendige Luftwechselrate für die jeweilige Nutzung zuverlässig bereitstellen. Durch die gestiegenen Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Gebäuden werden bei Belüftungskonzepten energetische Gesichtspunkte wie eine energieeffiziente Betriebsweise immer wichtiger. Generell unterscheidet man zwischen freien und mechanischen Lüftungssystemen, deren Bauformen und Funktionsweisen nachfolgend skizziert werden. In Abb. 7 wird eine Übersicht mit den gängigsten Lüftungssystemen für Wohngebäude gegeben. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der angebotenen Systeme werden nur die wichtigsten Grundprinzipien und Bauformen dargestellt.

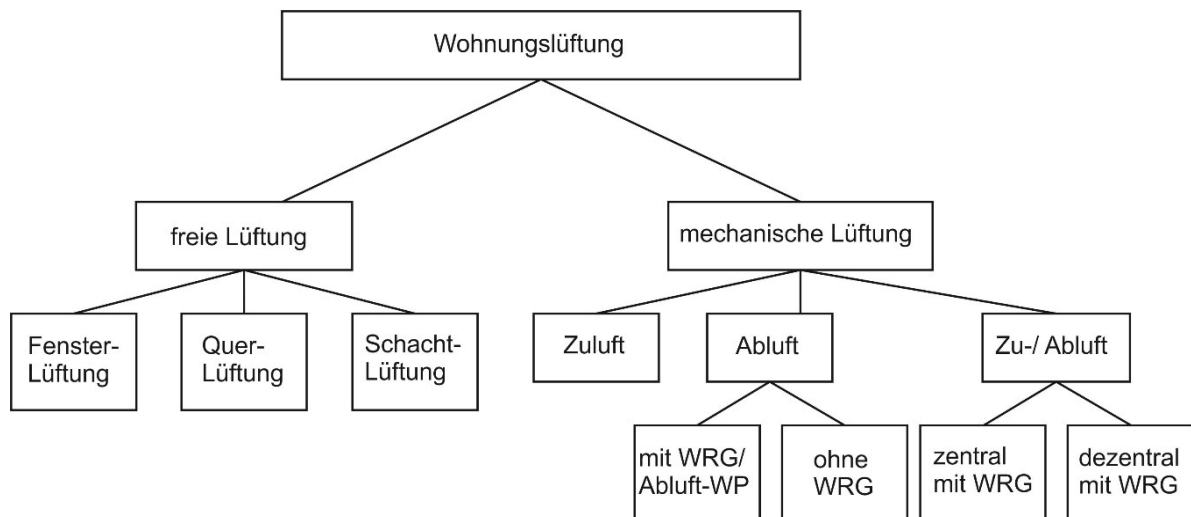


Abb. 7: Lüftungssysteme für Wohngebäude nach [DIN 1946-6]

2.2.1 Freie Lüftung

Freie Lüftungssysteme benötigen zum Luftaustausch am Gebäude anliegende Temperatur- und Winddruckgradienten. Die Funktionsweisen für Quer- und Schachtlüftung sind in Abb. 8 und Abb. 9 zu sehen. Bei der Querlüftung befinden sich jeweils an gegenüberliegenden Gebäudewandfassaden Außenlufteinlässe, wie Fenster, Türen oder spezielle öffnere Falze im Fensterbereich [REGEL-air 2013], durch die Frischluft einströmt und mithilfe von Überströmöffnungen in benachbarte Zonen des Gebäudes transportiert wird. Mit diesem System kann der Luftwechsel zwar erhöht werden, um das Risiko von Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung zu reduzieren, allerdings führt diese Art der Lüftung insbesondere bei tiefen Außenlufttemperaturen zu unkontrollierten Lüftungswärmeverlusten. In den meisten Fällen kann daher nicht auf eine kontrollierte Fensterlüftung verzichtet werden. Je nach Windverhältnissen können Zugerscheinungen auftreten und die Außenluftdurchlässe führen insbesondere im städtischen Umfeld zu hohen Schallimmissionen. Querlüftung wird daher hauptsächlich im Sommer zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung eingesetzt.

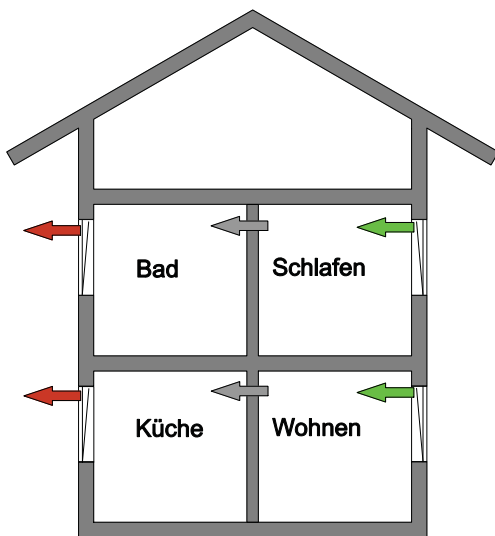


Abb. 8: Querlüftungsprinzip

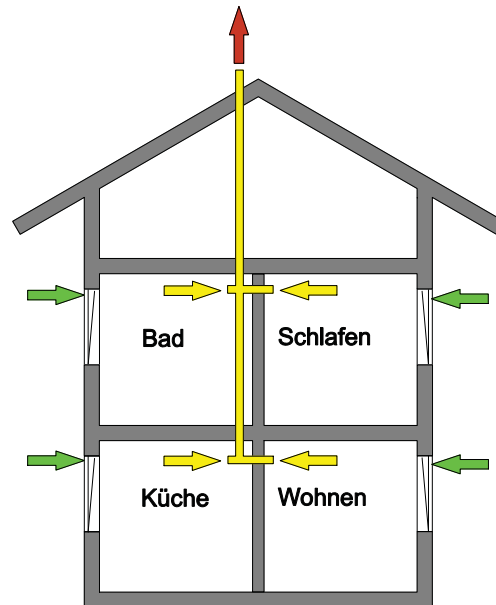


Abb. 9: Schachtlüftungsprinzip

Schachtlüftungssysteme nutzen den thermischen Auftrieb zum Lufttransport. Dazu wird ein zentraler Schacht im Gebäude angeordnet und mit den Ablufträumen verbunden. Der erreichbare Volumenstrom kann über den Dichteunterschied der Raum- und Außenluft und über die Höhe des Schachts nach [Rechnagel und Sprenger 2011] ermittelt werden. Die verbrauchte Luft wird über den Schacht abgeführt und Frischluft strömt über die Zulufträume und Außenluftdurchlässe (ALD) nach. Schachtlüftung funktioniert im Winter am zuverlässigsten, sorgt allerdings, wie auch die Querlüftung, für unangemessen hohe Wärmeverluste.

Freie Lüftungssysteme sind für die nachträgliche Sanierung von Gebäuden nicht zu empfehlen, da ihre Effektivität maßgeblich von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Sie sind somit nicht regelbar und machen daher immer eine Unterstützung des Nutzers notwendig [Heinz 2011].

2.2.2 Mechanische Lüftung

Mechanische oder auch ventilatorgestützte Lüftungssysteme verwenden Ventilatoren, um den Luftaustausch in vorgegebener Durchströmungsrichtung nutzerunabhängig sicherzustellen. Diese Systeme sind regelbar und unabhängig von den anliegenden Wind- und Temperaturbedingungen. Generell unterscheidet man zwischen Zuluft-, Abluft- und Zu- und Abluftanlagen [DIN 1946-6].

In Abluftanlagen wird verbrauchte Luft aus Ablufträumen wie Küchen, Bädern und Toiletten meist über zentrale Leitungen abgesaugt. Durch den daraus resultierenden Unterdruck in den Räumen strömt frische Luft über Außenluftdurchlässe im Wand- oder Fensterbereich nach. Eine Prinzipskizze eines zentralen Abluftsystems wird in Abb. 10 aufgezeigt. Dezentrale Systeme zur raumweisen Entlüftung von Gebäuden funktionieren ähnlich. Die Lüfter befinden sich jedoch in Raumnähe und verursachen höhere Schalldruckpegel. Eine klassische Wärmerückgewinnung durch die Nutzung der in der Abluft enthaltenen Wärme zur Erwärmung der Zuluft mit einem zentralen Wärmeübertrager ist nicht möglich [RWE 2010]. Kreislaufverbundsysteme (KVS), bei denen die Wärmetauscher örtlich voneinander getrennt aufgestellt werden, eignen sich jedoch

nur für industrielle Prozesse mit Großanlagen, bei denen die geförderten Luftmengen um ein Vielfaches höher sind als im Wohnungsbau [Beutler und Stettler 2012]. Aus diesem Grund werden Abluftsysteme oftmals in Kombination mit einer Abluftwärmepumpe betrieben und unterstützen damit die Trinkwarmwasserversorgung [Mürmann 2006].

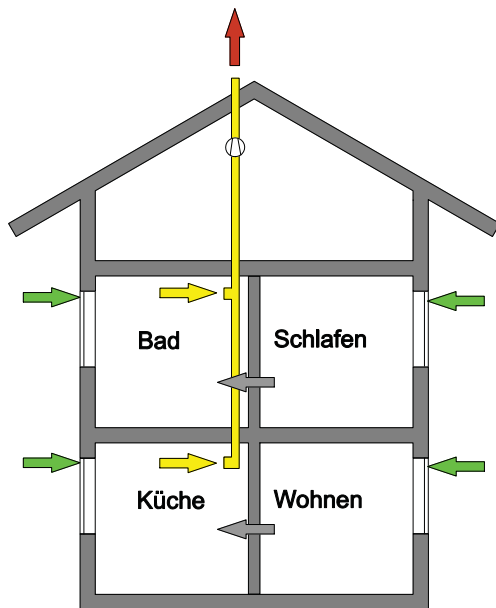


Abb. 10: Zentrale Abluftanlage nach [RWE 2010]

Zuluftanlagen werden in Wohngebäuden eher selten verwendet. Bei diesen Systemen werden Wohn- und Schlafräume über einen zentralen Ventilator und ein Luftverteilungsnetz mit Frischluft versorgt. Durch den erzeugten Überdruck im Gebäude wird feuchtwarme Luft in Fugen und Leckagen der Gebäudehülle gedrückt. Nach [Geißler und Hauser 2002] hängt das Feuchteschadensrisiko jedoch stark von der Geometrie der Leckage ab. Durchlaufende Spalte verhalten sich unkritisch, während Spalte mit Umlenkungen zu Sekundärtauwasserausfall führen können, da sich der Temperaturverlauf bei stationärer Durchströmung stark am Strömungsprofil ausrichtet [Hauser und Kempkes 2005].

Zentrale Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung verwenden ein Zuluftkanalnetz zur Versorgung der Wohn- und Schlafräume mit Frischluft. Die verbrauchte Luft wird über Abluftleitungen abgesaugt und zum Lüftungsgerät zurückgeführt, wo sich auch die notwendigen Ventilatoren zum Lufttransport befinden. Die beiden Luftströme werden im Wärmeübertrager, meist ein Plattenwärmeübertrager, im Kreuz-Gegenstromprinzip aneinander vorbeigeführt. Dort wird ein Großteil der in der Abluft enthaltenen Wärmeenergie zur Vorwärmung der kalten Außenluft überführt. Neue Lüftungsgeräte erreichen Wärmebereitstellungsgrade von über 90 % [TZWL 2011].

Bei der nachträglichen Installation von Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) im Wohngebäudebestand kommen derzeit verschiedene Systeme zum Einsatz [Fachverband Gebäude-Klima e.V. 2011]. Dabei wird grundlegend zwischen zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen unterschieden. Mit zentralen Anlagen werden komplette Gebäude belüftet, während dezentrale Lüftungsgeräte der raumweisen mechanischen Belüftung dienen. Ein Schema dieser beiden Konzepte ist in Abb. 11 und Abb. 12 zu sehen. Teilweise werden auch semizentrale Systeme für einzelne Geschosse oder Gebäudeabschnitte eingesetzt. Wartungs-

intensive Komponenten, beispielsweise für die Luftfilterung, befinden sich dann gebündelt an zentraler Stelle [Blume et al. 2001].

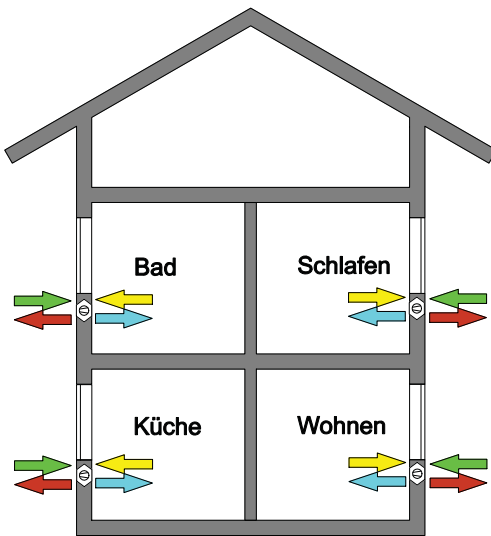


Abb. 11: Dezentrale Lüftung mit Einzelraum-Lüftungsgerät mit WRG

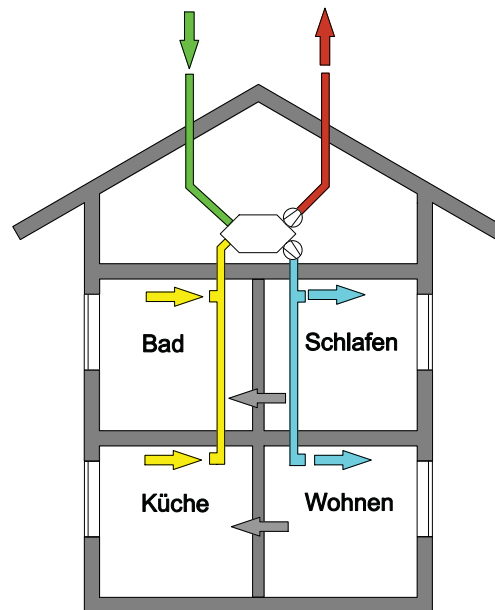


Abb. 12: Zentrale Zu- und Abluftanlage mit WRG

Die Wahl des Lüftungssystems hängt in den meisten Fällen von den baulichen Gegebenheiten, wie der Gebäudegröße und der Grundrissanordnung, ab. Zu- und Abluftanlagen für Altbau-sanierungen zeichnen sich vornehmlich durch platzsparende und kostengünstige Systeme aus [Pfluger 2005a]. Die häufigsten Bauformen sind wohnungszentrale Zu- und Abluftanlagen, dezentrale Lüftungsgeräte für einzelne Räume und Pendellüfter mit regenerativem Wärmeübertrager.

Bei zentralen Wohnungslüftungssystemen für Bestandssanierungen wird die Frischluft über ein Kanalnetz in die einzelnen Räume befördert. Konventionelle Luftleitungen aus Blechkanälen und Wickelfalzrohren, die bei Neubauten normalerweise Verwendung finden, können im Altbaubestand jedoch in den meisten Fällen aufgrund fehlender Geschosshöhen oder unvorteilhafter Grundrisse nicht eingesetzt werden. Zudem wird die Kanalführung oft aus gestalterischen Gründen durch eine Deckenunterkonstruktion verkleidet, die viel Platz in Anspruch nimmt. Deshalb kommen bei Bestandssanierungen häufig ovale oder flache Kanalquerschnitte mit geringen Aufbauhöhen zum Einsatz [Pluggit GmbH 2009], [Helios 2011]. Durch die platzsparende Anordnung der Kanäle an den Deckenkanten als Ringsystem können die Leitungslängen minimiert und damit der Druckverlust im Verteilnetz geringgehalten werden. Das Prinzip ist in Abb. 13 zu sehen.

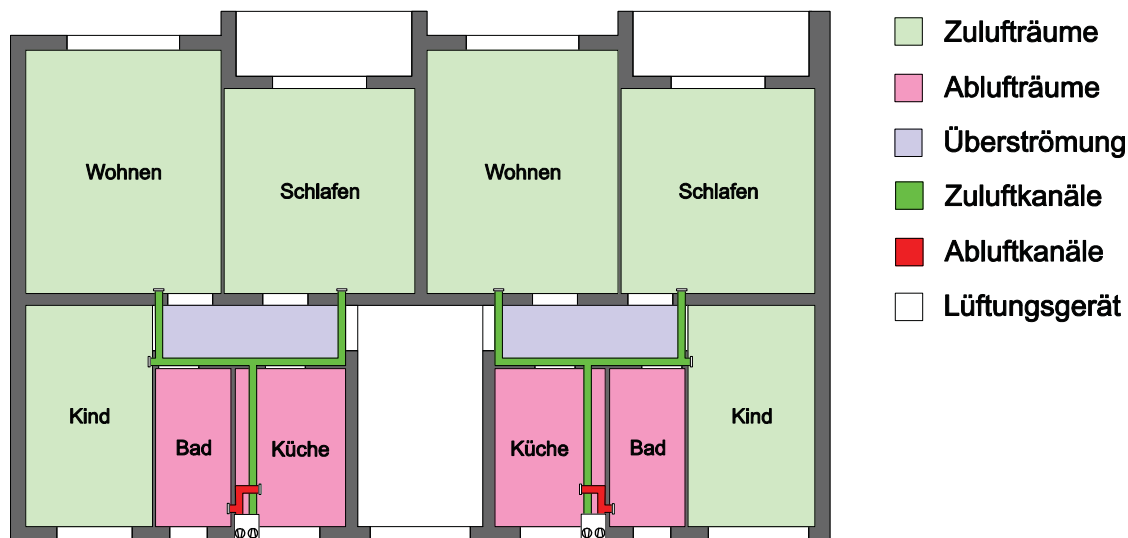


Abb. 13: Wohnungszentrale Zu- und Abluftanlagen mit Ringleitung im Mehrgeschosswohnungsbau

Zur Kostenreduzierung für die Realisierung der luftführenden Kanäle werden vorgefertigte Formstücke und Kunststoffelemente anstatt Blechkanäle verwendet. Das Zentralgerät wird bei diesen Anlagenkonzepten zumeist direkt im beheizten Bereich im Flur oder in einem der Ablufträume an Wand oder Decke angeordnet. Hierbei werden zur Wärmerückgewinnung nahezu ausschließlich Plattenwärmetauscher in Kreuz- oder Gegenstrombauweise eingesetzt. Regenerative Wärmeübertrager nach [VDI 3803] werden nur in Einzelraumgeräten verwendet, da durch diese Art der Wärmeübertragung Frischluft mit verunreinigter Luft aus den Wohnräumen gemischt wird. Trotz mehrheitlich standardisierter Komponenten der Luftkanalführung sind viele Arbeiten im Inneren der Wohnung notwendig, wie die Montage der Kanäle, die Wanddurchbrüche, die Verkleidung des Kanalnetzes und die Anbringung des Lüftungsgeräts.

Aufgrund der recht hohen baulichen Eingriffe bei Bestandssanierungen werden in den letzten Jahren auch vermehrt dezentrale Wohnungslüftungsanlagen eingesetzt. Diese Systeme ermöglichen gegenüber zentralen Lüftungsanlagen eine deutlich einfachere und individuelle Regelung der einzelnen Räume. Außerdem gestaltet sich der Planungsaufwand geringer. Allerdings sind die spezifischen Baukosten dieser Geräte höher als die der zentralen Lüftungssysteme [Pfluger 2005b] und eine leise Betriebsweise ist nur mit größerem Aufwand zu erreichen. Dezentrale Einzelgeräte unterscheiden sich nur in Größe und Effizienz von größeren Zentralgeräten. Sie werden zumeist in der Außenwand oder im Brüstungsbereich integriert und können direkt über einen Außenluftdurchlass erschlossen werden. Diese Geräte versorgen vorwiegend einzelne Räume, allerdings ist auch eine Anbindung an ein Kanalnetz zur Belüftung mehrerer Räume möglich. Großer Nachteil dieser Systeme ist die schalltechnisch ungünstige Lage des Lüftungsgeräts im Wohnraum. Speziell im Mietwohnungsbau werden zentrale Lüftungsanlagen bevorzugt, da die turnusmäßigen Wartungsarbeiten, wie Filtertausch und Reinigung des Wärmetauschers, in einem Technikraum im Keller oder Dachraum durchgeführt werden können. Bei wohnungszentralen Lüftungssystemen gestaltet sich die Wartung logistisch aufwendiger, da der Zugang zu jeder einzelnen Wohneinheit garantiert sein muss.

Außenwandintegrierte Einzelgeräte mit einem regenerativen Wärmespeicher stellen eine weitere Möglichkeit dar, ein Gebäude zu belüften. Diese Lüfter, auch Pendellüfter genannt, werden in die

Außenwand eingebaut und enthalten neben einem Ventilator mit variabler Drehrichtung einen Keramik Kern, der als Wärmespeicher dient [InVENTer 2013]. Das Funktionsprinzip dieses Lüftungssystems ist in Abb. 14 dargestellt. Im Abluftbetrieb wird der Wärmespeicher mit warmer Abluft durchströmt und gibt die gespeicherte Wärmeenergie im Zuluftbetrieb bei entgegengesetzter Drehrichtung an die einströmende Außenluft ab. Eine Wohneinheit wird mit etwa vier bis sechs Einzellüftern ausgestattet, sodass eine Durchströmung nach dem Querlüftungsprinzip möglich ist. Die Lüfter arbeiten auf einer Seite des Gebäudes paarweise im Abluftmodus und auf der gegenüberliegenden Gebäudeseite im Zuluftbetrieb. Nach etwa einer Minute wechselt die Drehrichtung aller Ventilatoren. Auch hier befinden sich die Ventilatoren direkt in den Wohnräumen, was zu höheren Schalldruckpegeln führen kann. Die Wartungskosten für die außenwandintegrierten dezentralen Lüfter sind deutlich höher als bei zentralen Systemen, da pro Wohneinheit mindestens vier Lüfter eingesetzt werden und neben dem Austausch der Luftfilter zudem die Keramikkerne der Geräte regelmäßig gereinigt werden müssen. Ein weiterer Nachteil dieser Systeme ist die Tatsache, dass anfallendes Tauwasser unkontrolliert über die Fassade abläuft. Die Abluft aus den Räumen durchströmt den Wärmetauscher und überträgt einen Großteil der enthaltenen Wärmeenergie auf die kalte Außenluft. Durch den Wärmeentzug kann die ausströmende Luft am Wärmetauscher soweit abkühlen, dass die in der Luft enthaltene Feuchte als Tauwasser ausfällt.

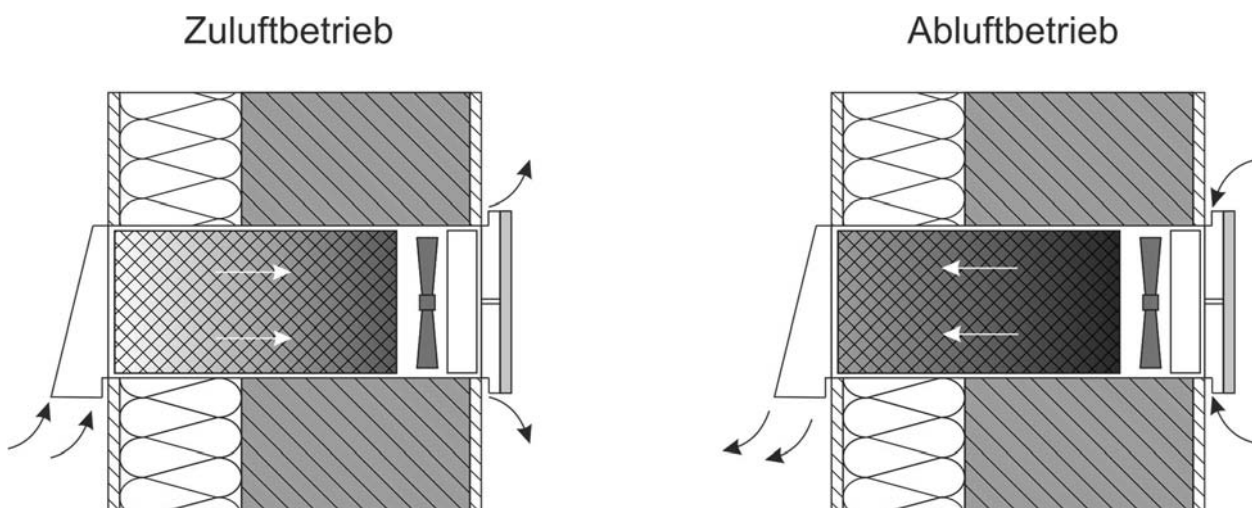


Abb. 14: Dezentrale Wohnungslüftung mit WRG nach dem Pendellüfter-Prinzip gemäß [InVENTer 2013]

2.3 Kriterien und Anforderungen an mechanische Lüftungssysteme

Der Einsatz von Lüftungstechnik in Bestands- und Neubauten wird in den kommenden Jahren weiter ansteigen. Grund hierfür ist die Forderung nach einer luftdichten Ausführung der Gebäudehülle für Neubauten und die möglichst nutzerunabhängige Sicherstellung eines ausreichenden Luftwechsels zur sicheren Abfuhr von Luftschadstoffen, Gerüchen und Luftfeuchte. Dafür eignen sich einfache, robuste und regelbare Lüftungskonzepte. Im Rechenverfahren der Energieeinsparverordnung [EnEV 2009] und in deren weiterführenden Novelierungen wird schon derzeit für das Referenzgebäude ein bedarfsgeführtes Abluftsystem angesetzt. Im Gebäudebestand kann hingegen durch energieeffiziente Lüftungssysteme nicht nur der Mindestluftwechsel sichergestellt werden, sondern sind durch die Senkung der Lüftungswärmeverluste mit dem Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen weitere Energieeinsparungen erzielbar.

Für die Planung, die Konzeptionierung und eine optimierte Betriebsweise solcher Systeme sind viele Kriterien zu erfüllen. Energetische Aspekte betreffen hierbei vor allem die Art und Höhe der erzielbaren Wärmerückgewinnung, den rationellen Energieeinsatz sowie die Dimensionierung und Ausführung des Luftkanalnetzes. Die hydraulischen Eigenschaften der Luftführung spielen eine wesentliche Rolle, um den Systemdruckverlust und den benötigten Hilfsenergieeinsatz zu minimieren. Des Weiteren sind schutztechnische Anforderungen wie der Brandschutz zu beachten, damit weder durch das Lüftungsgerät noch durch irgendeine Komponente des Lüftungssystems die Entstehung eines Brandes oder die Rauch- und Brandweiterleitung begünstigt wird. Die Einhaltung der Hygieneanforderungen ist wichtig, damit die Gesundheit der Gebäudenutzer nicht gefährdet wird. Dazu müssen Lüftungssysteme in bestimmten Zeitintervallen gewartet und im Falle einer Verschmutzung gereinigt werden. Für die Akzeptanz eines Lüftungssystems müssen außerdem Komfortanforderungen berücksichtigt werden. Darunter fallen akustische Aspekte, wie der Schallschutz oder auch die Minderung des Zugluftrisikos bei der Lufteinbringung in den Raum.

2.3.1 Energetische Aspekte

Die Bewertung der Effizienz einer Lüftungsanlage kann, ähnlich wie bei Heizsystemen, in verschiedene Prozessschritte unterteilt werden. Das bedeutet, dass man zwischen der Luftförderung, der Luftverteilung über das Leitungsnetz und der Übergabe an den jeweiligen Raum differenziert.

Energetisch betrachtet entstehen Lüftungswärmeverluste durch das Austauschen der Raumluft durch kalte bzw. vorgewärmte Frischluft. Entscheidend für die Quantifizierung der Wärmeverluste sind dabei der mittlere Luftwechsel der Nutzungseinheit und der Temperaturunterschied zwischen Raumluft und der zugeführten Frischluft. Bei Fenster- und Fugenlüftung weist die zugeführte Luft Außenlufttemperatur auf und der Luftwechsel bestimmt sich nach den Berechnungsansätzen aus Kapitel 2.1. Je höher der geförderte Luftwechsel während der Heizperiode ist, desto größer sind die Lüftungswärmeverluste, die über das Heizungssystem zusätzlich kompensiert werden müssen. Zentrale Wohnungslüftungsanlagen nutzen Wärmerückgewinnung für die Temperierung der kalten Außenluft. Dazu werden in rekuperativen Wärmeübertragern die Abluft aus dem Raum und die kalte Außenluft räumlich getrennt

aneinander vorbeigeführt, ohne dass sich die Luftströme vermischen können. Die Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers wird mit dem Wärmerückgewinnungsgrad η charakterisiert. Dieser beschreibt das Verhältnis der ein- und ausströmenden Enthalpiemassenströme am Wärmeübertrager, sodass neben sensibler auch latente Wärme berücksichtigt wird [Bosy 2014]. Nach [DIN 4701-10] werden raumluftechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung über den Wärmebereitstellungsgrad energetisch bewertet. Dieser „*charakterisiert die Temperaturerhöhung der Zuluft bezogen auf die maximal mögliche Temperaturerhöhung. In den Wärmebereitstellungsgrad gehen neben der Betriebscharakteristik des Wärmeübertragers (WÜT) auch die Abwärme von elektrischen Komponenten (Ventilatoren, Regelung) ein*“. In der Praxis werden die Wärmebereitstellungsgrade zentraler Lüftungsgeräte über Prüfmethode nach DiBt⁴, [DIN EN 13141-7] und PHI⁵ bestimmt. Nach [Burkert 2010] wird gezeigt, dass sich die gemessenen Werte unterscheiden und die Wärmerückgewinnung nach DIBt-Prüfmethode überbewertet wird. Als weitere Kenngröße für die Wärmerückgewinnung wird häufig die Rückwärmezahl Φ [VDI 3808] angegeben:

$$\Phi = \frac{\theta_{Zu} - \theta_{Au}}{\theta_{Ab} - \theta_{Au}} \quad (2.1)$$

Die Rückwärmezahl beschreibt das Temperaturverhältnis der ein- und austretenden Luftströme. Es werden jedoch weder der Energieinhalt der feuchten Luft noch Wärmeeinträge aus elektrischen Komponenten des Lüftungsgeräts berücksichtigt [Bosy 2014]. In [DIN EN 13053] werden Wärmerückgewinnungsklassen für raumluftechnische Anlagen (H1-H6) definiert, die allerdings nicht für Wohnungslüftungsgeräte anzuwenden sind, da die geförderten Luftvolumenströme deutlich unterhalb der angegebenen Werte liegen. Typische nach TZWL⁶ gemessene Wärmebereitstellungsgrade liegen je nach gefördertem Volumenstrom bei 80-95% [TZWL 2011]. In [DIN 4719] werden erhöhte Anforderungen für energieeffiziente Lüftungsgeräte, sogenannte E-Geräte, aufgeführt. Für zentrale Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung muss der Wärmebereitstellungsgrad größer 80% betragen und der elektrische Hilfsstrombedarf kleiner als 0,45 Wh/m³ sein. Zudem sollte der Zustand der Filter optisch oder akustisch überwacht werden, damit der Filterdruckverlust nicht zu stark ansteigt.

Die Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers ist zwar maßgeblich für die rückgewinnbare Wärmeenergie der Lüftungsanlage, allerdings kann die Ausführung des Luftleitungssystems die Effizienz des Gesamtsystems stark beeinflussen. Aus diesem Grund müssen Wärmeverluste über das Kanalnetz minimiert werden, insbesondere dann, wenn die Luftkanäle Einfluss auf die Wärmebilanz haben [VDI 3803]. Ein Absinken der Zulufttemperatur kann zu einer eingeschränkten thermischen Behaglichkeit und Zugerscheinungen führen. Im Abluftbereich kann die Gefahr von Tauwasserausfall steigen, wenn die feuchte Abluft auf dem Weg zum Lüftungszentralgerät zu stark abkühlt. [VDI 2087] liefert die nötigen Berechnungsgrundlagen für die Bestimmung der Temperaturänderungen in Luftleitungen und zulässige Untertemperaturen für verschiedene Lufttemperaturen und relative Luftfeuchten. Die luftführenden Kanäle sollten daher

⁴ Deutsches Institut für Bautechnik www.dibt.de

⁵ Passivhaus Institut www.passiv.de

⁶ Europäisches Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte e. V www.tzwl.de

möglichst innerhalb der thermischen Zone verlegt werden und in unbeheizten Bereichen, wie Kellern oder Dachböden, mit ausreichender Wärmedämmung gegen Energieverluste geschützt werden. In [DIN 1946-6] Tabelle 20 sind Vorgaben für die Ausführung der Dämmdicke sowie der Wärmeleitfähigkeit zu finden.

Der elektrische Hilfsenergiebedarf einer Lüftungsanlage hängt von der Effizienz der Ventilatoren und der Beschaffenheit des angeschlossenen Luftleitungsnetzes ab. In der Regel werden stromsparende Gleichstromventilatoren mit hohem Gesamtwirkungsgrad zur Luftförderung eingesetzt. Als Kenngröße für die Bestimmung der Effizienz eines Ventilators wird die spezifische Ventilatorleistung SFP (Specific Fan Power) verwendet. Sie setzt sich aus dem Verhältnis der elektrischen Leistungsaufnahme der Zu- und Abluftventilatoren zum geförderten Gesamtvolumenstrom zusammen und berechnet sich nach Gleichung (2.2).

$$P_{SFP} = \frac{P}{q_V} = \frac{\Delta p}{\eta_{tot}} \quad (2.2)$$

In [DIN EN 13779: 2007-09] werden für raumluftechnische Anlagen in Nichtwohngebäuden verschiedene SFP-Kategorien verwendet, die jedoch häufig auch für die Bewertung von Wohnungslüftungsanlagen angewandt werden. Für Komponenten der Lüftungsanlage, die zusätzliche Druckverluste verursachen, wie beispielsweise Filter oder Wärmeübertrager, werden erweiternde SFP-Werte angegeben, die aufaddiert werden und so die spezifische Ventilatorleistung erhöhen. Wohnungslüftungsanlagen haben aufgrund ihrer Baugröße generell niedrigere Ventilatorwirkungsgrade als große raumluftechnische Anlagen. In [Gremel et al. 2011] wird jedoch festgestellt, dass Kleinanlagen wegen der deutlich geringeren internen und externen Druckverluste insgesamt zu kleineren SFP-Werten führen und somit einen effizienteren Stromeinsatz aufweisen. Genauere Betrachtungen zum hydraulischen Verhalten von Luftleitungssystemen werden in Kapitel 2.3.2 erläutert.

Für die Dimensionierung des Luftkanalnetzes bei Systemen mit fassadenintegrierter Luftkanalführung ist die Bestimmung der Wärmeverluste über die luftführenden Kanäle von entscheidender Bedeutung. Die Berechnungsansätze zur Temperaturänderung in Luftleitungen nach [VDI 2087] können nur eingeschränkt angewendet werden, da sich die anliegende Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur ändert und der Wärmeübergang zwischen der strömenden Luft und der Kanaloberfläche ebenfalls beeinflusst wird. Zur Quantifizierung der Temperaturentwicklung in dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen sind daher Modelle zu entwickeln, die das Wärmeübertragungsverhalten des strömenden Fluides auf die Kanaloberfläche besser beschreiben. Die Angabe des Wärmerückgewinnungsgrads des Lüftungsgeräts gibt nur die Effizienz des Wärmeübertragers wieder. Um das Lüftungssystem gesamtenergetisch bewerten zu können, sollte diese energetische Kenngröße zu einem Systemwirkungsgrad erweitert werden, um das Lüftungssystem einschließlich der fassadenintegrierten Leitungsführung beurteilen zu können. Der Systemwirkungsgrad könnte auch für Systeme angewendet werden, deren Luftkanalführungen teilweise im unbeheizten Bereich, wie im Keller und Dachboden, angeordnet sind. Hierfür wird in Kapitel 5.5.1 ein Vorschlag erarbeitet.

2.3.2 Hydraulische Aspekte

Durch eine optimierte hydraulische Auslegung des Luftleitungssystems können die Druckverluste im Zuluft- und Abluftkanalsystem und der damit verbundene Lüfterstrombedarf begrenzt werden. Die Bestimmung des Systemdruckverlusts im Lüftungskanalnetz ist zudem wichtig für die Auswahl des Lüftungszentralgeräts. Eine strömungstechnisch günstige Luftverteilung kann mit kurzen Leitungslängen, glatten Kanaloberflächen, wenigen Abzweigungen und Anschlussstücken und geringen Strömungsgeschwindigkeiten in den Kanälen erreicht werden. Der Reibungswiderstand in geraden Luftkanälen wird über die Darcy-Weisbach-Gleichung berechnet [Baumgarth et al. 2003].

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (2.3)$$

Der resultierende Differenzdruck geht dabei quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit der Luft einher. Zur Begrenzung der Luftgeschwindigkeit und den dadurch verursachten Druckverlusten sowie zur Vermeidung hoher Geräuschentwicklung in den Luftkanälen liefert [DIN 1946-6] Auslegungsempfehlungen für die Dimensionierung der Luftleitungsquerschnitte. Die empfohlenen Lüftungsquerschnitte für unterschiedlich hohe Luftvolumenströme und die daraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abb. 15 dargestellt.

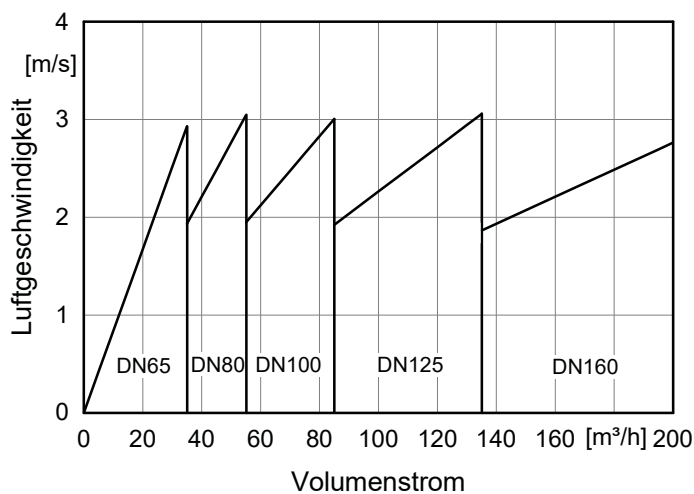


Abb. 15: Näherungsweise Dimensionierung der Luftleitungen in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms gemäß [DIN 1946-6: 2009-05]

In Lüftungsanlagen im Wohnungsbau mit „E“-Kennzeichnung für erhöhte Energieeffizienz oder der „H“-Kennzeichnung für erhöhte Hygieneanforderungen sollte eine maximale Luftgeschwindigkeit in Sammelleitungen von 5 m/s und in sonstigen Leitungen von höchstens 3 m/s nicht überschritten werden [DIN 1946-6]. Berechnungsdiagramme für die Auslegung von runden Luftleitungen aus Stahlblech in Abhängigkeit der Nennweite und dem geförderten Volumenstrom sind in [VDI 2087] zu finden.

Die Strömungsverhältnisse und die Art der Strömung im Lüftungskanal werden durch die Reynolds-Zahl charakterisiert. Diese dimensionslose Kennzahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften und kann bei Rohrströmungen über die Strömungsgeschwindigkeit, die kinematische Viskosität und den Durchmesser des Kanals bestimmt werden.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{\dot{V} \cdot d}{A \cdot \nu} \quad (2.4)$$

In der Praxis werden anstatt kreisförmigen Rohren sehr häufig Luftleitungen mit rechteckigem Querschnitt verwendet. Die Bestimmung der Druckverluste erfolgt dann über den hydraulischen Durchmesser d_h bzw. gleichwertigen Durchmesser d^* des Kanals. Der hydraulische Durchmesser eines rechteckigen Kanals mit den Seitenlängen a und b entspricht dem Durchmesser eines runden Rohres, das bei gleicher mittlerer Strömungsgeschwindigkeit die gleichen Druckverlustkennwerte aufweist [Baumgarth et al. 2003]. Mithilfe der Querschnittsfläche A und dem Umfang U des Rohres kann der hydraulische Durchmesser bestimmt werden.

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} \quad (2.5)$$

Die Querschnittsfläche des rechteckigen Kanals unterscheidet sich von der Rohrleitung trotz des gleichen hydraulischen Durchmessers. Da die Strömungsgeschwindigkeit der Luft jedoch definitionsgemäß gleich ist, ergeben sich aufgrund der Kontinuitätsgleichung unterschiedlich hohe Luftmengen, die transportiert werden. Aus diesem Grund wird der gleichwertige Durchmesser d^* eingeführt. Der gleichwertige Durchmesser eines rechteckigen Rohres stimmt mit dem Durchmesser eines runden Rohres überein, wenn bei gleichem Volumenstrom der gleiche Druckverlust verursacht wird [Recknagel und Sprenger 2011].

$$d^* = \sqrt[5]{\frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{a^3 \cdot b^3}{a + b}} \quad (2.6)$$

Eine wichtige Materialeigenschaft des Lüftungskanals ist die Rauigkeit ε . Je glatter die Innenoberfläche des Kanals ist, desto geringer ist die Reibung an der Oberfläche und der damit verbundene Strömungsverlust. Typische Rauigkeitswerte für verschiedene Materialien können der Literatur [Recknagel und Sprenger 2011], [Wagner 2012], [Ihle et al. 2011] entnommen werden. Die gebräuchlichsten Werkstoffe für Lüftungskanäle sind verzinkte Stahlbleche und Kunststoffe. Für Abluftleitungen und Schächte werden oftmals Mauerwerk und Beton verwendet. Eine Übersicht über die wichtigsten Ausführungen und hydraulischen Eigenschaften von Luftleitungen liefert [VDI 2087]. Druckverluste, die in einem geraden Kanalabschnitt entstehen, sind abhängig von der Rohrreibungszahl λ . Diese dimensionslose Kennzahl kann über die Strömungsverhältnisse im Rohr, also über die Reynolds-Zahl Re , ermittelt werden. Bei laminarer Schichtströmung ohne Querverwirbelungen bis zu einer Reynolds-Zahl von ungefähr 2.300 ist der Rohrreibungsbeiwert unabhängig von der Rauigkeit ε . Die Reibungszahl ergibt sich daher zu:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.7)$$

Für die Berechnung der Reibungszahl bei turbulenter Strömung kann auf empirische Formeln zurückgegriffen werden [Recknagel und Sprenger 2011]. Diese Formeln beschreiben verschiedene Strömungsgebiete. Man unterscheidet Strömung im hydraulisch glatten Rohr, im

hydraulisch rauhen Rohr und Strömung im Übergangsbereich bei Reynolds-Zahlen zwischen 4.000 und 10.000. Bei Anwendungen in der Lüftungstechnik herrschen vorrangig Reynoldszahlen im Übergangsbereich. Der Rohrreibungsbeiwert kann hierfür mit der impliziten Colebrook-White-Gleichung bestimmt werden.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot d} \right] \quad (2.8)$$

Diese Gleichung kann iterativ gelöst werden und liefert so näherungsweise die Reibungszahl für den Übergangsbereich bei bekannter Reynolds-Zahl und bekannter Rauigkeit. Alternativ zu den empirischen Formeln nach Nikuradse, Prandl, Kármán, Moody und Colebrook kann die Reibungszahl auch aus dem Moody-Diagramm [Moody 1944] grafisch ermittelt werden. Die Berechnung von Druckverlusten an Einzelwiderständen wie Klappen, Umlenkungen und anderen Einbauten erfolgt über den dimensionslosen Widerstandsbeiwert ζ nach Gleichung (2.9).

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (2.9)$$

Widerstandsbeiwerte von Anschlüssen, Diffusoren, Umlenkungen und Verzweigungen werden in der Regel messtechnisch ermittelt [Heinz 2011] und sind für kreisförmige und rechteckige Kanäle in Tabellenbüchern und technischen Regelwerken [Wagner 2012], [VDI 2087], [Ihle et al. 2011] zu finden.

Der Ventilator einer raumluftechnischen Anlage fördert die benötigten Luftvolumenströme in alle Bereiche eines Gebäudes und muss so dimensioniert werden, dass der gesamte Druckverlust eines Luftleitungsnetzes inklusive aller Einzelwiderstände kompensiert werden kann. Im Leistungsschaubild kann das Kanalnetz über die Anlagenkennlinie beschrieben werden. Der gesamte Druckverlust wird über den Volumenstrom aufgetragen und folgt aufgrund des quadratischen Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und Volumenstrom einer Parabel. Die vom Ventilator aufzubringende Druckerhöhung über dem veränderlichen Volumenstrom charakterisiert den Lüfter und wird als Ventilator-kennlinie bezeichnet. Der Schnittpunkt zwischen Ventilator- und Anlagenkennlinie ergibt den aktuellen Betriebspunkt der Lüftungsanlage. In Abb. 16 sind beispielhaft die Anlagenkennlinie und die charakteristische Kennlinie eines Radialventilators mit dem dazugehörigen Betriebspunkt aufgetragen. Bei konstanter Drehzahl des Ventilators und unveränderlichem Gesamtdruckverlust des Luftkanalnetzes, ohne zusätzliche Drosselungen an den Tellerventilen oder geänderten Klappenstellungen, ist nur der Zustand im Betriebspunkt der Kennlinien möglich [Mürmann 2006].

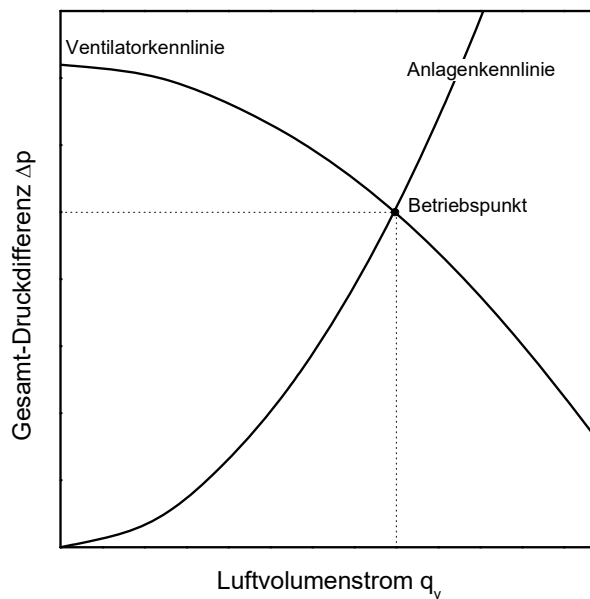


Abb. 16: Ventilator- und Anlagenkennlinien im Leistungsschaubild gemäß [Recknagel und Sprenger 2011], eigene Darstellung

Stimmt die geförderte Gesamtluftmenge im Betriebspunkt der Anlage nicht mit dem Auslegungsvolumenstrom überein, müssen am Ventilator oder am Luftleitungssystem Veränderungen vorgenommen werden.

Soll der Luftvolumenstrom im Betriebspunkt um den Wert Δq_v reduziert werden, sind grundsätzlich zwei Möglichkeiten realisierbar. In Abb. 17 wird die Modifizierung der Anlagenauslegung am Beispiel einer Druckverlust- sowie einer Drehzahlregelung aufgezeigt. Im linken Leistungsschaubild ist das Vorgehen über eine Druckverlustregelung zu sehen. Dazu wird der Druckverlust im Luftkanalnetz durch eine Drosselung gezielt erhöht, beispielsweise indem der Lüftungsquerschnitt an Ventilen verkleinert wird. Die Charakteristik der geänderten Anlagenkennlinie weist dann einen steileren Verlauf auf und der neue Betriebspunkt 2 stellt sich als Schnittpunkt mit der Ventilator-kennlinie ein.

Eine Reduzierung der geförderten Luftmenge kann auch über eine Regelung der Drehzahl am Ventilator vorgenommen werden. Vermindert man die Drehzahl des Lüfters, so führt dies im Leistungsschaubild zu einem anderen Kennlinienverlauf. Der neue Betriebspunkt 2 ergibt sich durch eine Verschiebung entlang der Anlagenkennlinie. Der resultierende Gesamtdruckverlust der Anlage reduziert sich im Vergleich zum Ausgangszustand und hat somit einen geringeren Leistungsbedarf der Ventilatoren zur Folge.

Durch die Druckverlustregelung stellt sich bei gleichem gefördertem Volumenstrom eine höhere Gesamtdruckdifferenz ein als bei der Drehzahlregelung und damit auch ein höherer Strombedarf für die Lüftungsanlage.

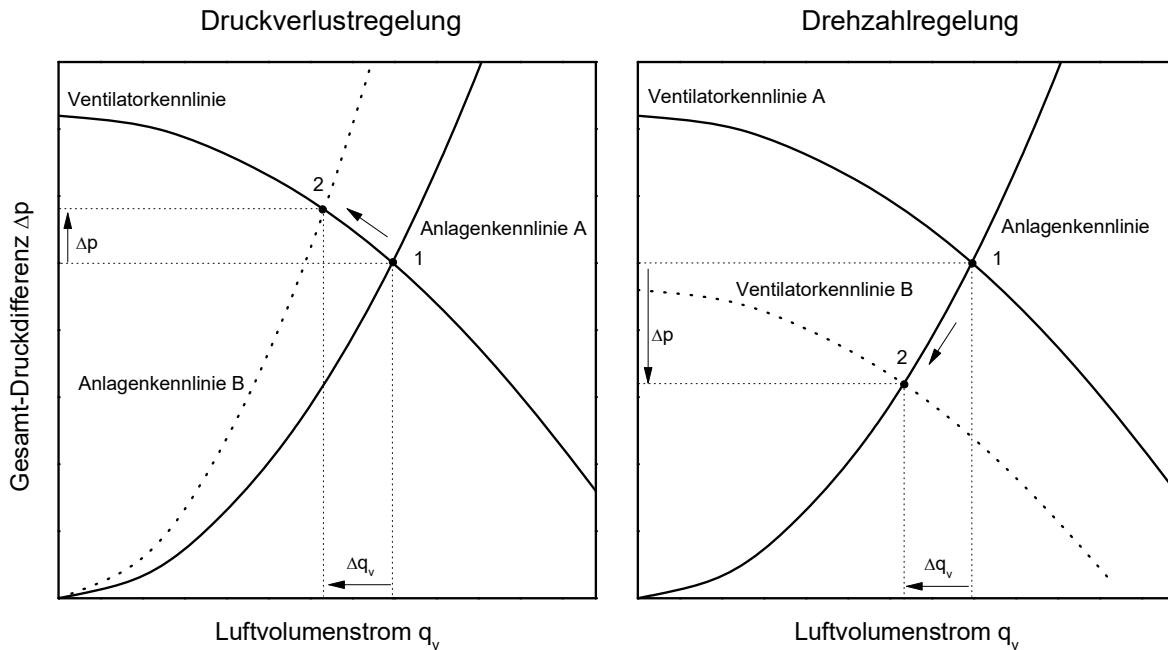


Abb. 17: Dosierung des Luftvolumenstroms einer Lüftungsanlage mittels Druckverlustregelung und Drehzahlregelung

Der Ventilator erzeugt eine Druckerhöhung, um den geforderten Luftvolumenstrom über das Luftkanalsystem in die einzelnen Räume zu transportieren. Damit die Auslegungsluftmengen für die jeweiligen Lüftungsabschnitte eingehalten werden und keine Luft unkontrolliert an Übergangsstücken und Falzen ein- und ausströmen kann, müssen die luftführenden Kanäle luftdicht sein. Leckagen können zu höheren Geräuschemissionen, zusätzlichen Wärmeverlusten, einem erhöhtem Hilfsstrombedarf und letztendlich zu Mehrkosten im Vergleich zu einer luftdichten Ausführung des Luftkanalnetzes führen [Luft 2009]. Die Dichtheit der luftführenden Leitungen ist daher ein wichtiges Kriterium für den energieeffizienten Betrieb einer Lüftungsanlage. Nach [DIN EN 12237] und [DIN EN 1507] werden Luftdichtheitsklassen für kreisförmige bzw. rechteckige Luftkanäle angegeben, die Grenzwerte für die Leckluft rate f_{\max} definieren. Die Klassifizierungen der Luftleitungen sind in Tab. A 1 und Tab. A 2 im Anhang aufgeführt.

Dämmstoffintegrierte Lüftungskanäle können aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit im Vergleich zu herkömmlichen Materialien andere hydraulische Eigenschaften aufweisen. Inwieweit sie sich als Lüftungskanäle einsetzen lassen und wie hoch der daraus resultierende Druckverlust ist, wurde bisher noch nicht experimentell bestimmt. Des Weiteren sind passende Kanalgeometrien zu wählen, sodass die Luftkanalführung platzsparend auf der Fassade angeordnet werden kann und gleichzeitig die Kanalluftgeschwindigkeit und der damit einhergehende Druckverlust nicht zu stark ansteigen. Bei Umlenkungen, Anschlüssen und der strömungsgünstigen Lufteinbringung in den Raum müssen gesonderte Lösungen entwickelt werden, da nicht auf handelsübliche Formstücke zurückgegriffen werden kann. Der Anschluss der einzelnen Kanaldämmplatten aneinander muss luftdicht hergestellt werden, um Leckagen im Luftkanalnetz zu vermeiden. Hier ist zu prüfen, ob ein Nut-und-Feder-System zwischen den Platten ausreichend ist oder weitere Maßnahmen zur Abdichtung notwendig sind.

2.3.3 Akustische Aspekte

Die akustischen Eigenschaften sind für die Akzeptanz von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau sehr wichtig. Die Geräuscentstehung und Ausbreitungsmechanismen sollten daher schon bei der Planung von Lüftungssystemen betrachtet werden, um geeignete und notwendige Schallschutzmaßnahmen entwickeln zu können. Technische Regelwerke liefern Grundlagen über die Schallentstehung in Rohrleitungen [VDI 3733] sowie Schallausbreitungswege [VDI 3803] und geben Hinweise für die Lärminderung in raumlufttechnischen Anlagen [VDI 2081].

Die Geräuscentstehung in Lüftungsanlagen sowie die Strömungsgeräusche im Leitungssystem werden hauptsächlich durch den Ventilator beeinflusst. Sie führen zu einem breitbandigen Rauschen, dessen Schalleistung mit der vierten bis sechsten Potenz der Umlaufgeschwindigkeit ansteigt [VDI 2081]. Maßgebliche Beurteilungsgröße für das Ventilatorgeräusch ist der Schalleistungspegel in dB(A), der meist für die einzelnen Lüfter oder das Zentrallüftungsgerät von den Herstellern angegeben wird. Die Geräuscentstehung kann jedoch von Komponenten wie Klappen, Reglern und Einbauten im Luftleitungsnetz beeinflusst werden. Zur Vermeidung der Luftschallabstrahlung am Aufstellungsort werden Lüftungsgeräte gekapselt und beispielsweise mit absorbierender Innenauskleidung versehen.

Drehende und schwingende Komponenten in Lüftungsanlagen können angeschlossene Strukturen zum Schwingen anregen. Eine Körperschallentkopplung kann durch dämpfende Aufhängungen oder eine schwingungsisolierte Aufstellung erreicht werden [VDI 3803]. Die Schalleistung des Ventilators wird nahezu komplett in das Luftleitungsnetz übertragen. Durch den Einbau von Schalldämpfern zwischen dem Lüftungsgerät und angeschlossenem Kanalnetz kann der Schalleintrag in die luftführenden Rohre deutlich vermindert werden. Zudem empfiehlt es sich, den Außenlufteinlass und den Fortluftauslass nicht in der Nähe der Fenster der Wohnräume zu positionieren, um Schallimmissionen über Außenbauteile zu verhindern. Schalldämpfer werden über ihre frequenzabhängige Dämpfungscharakteristik, der Einfügungsdämpfung, gekennzeichnet [VDI 3803]. Das Einfügungsdämpfungsmaß beschreibt die Schalleistungspegeldifferenz, die durch den Einsatz des Schalldämpfers erzielt werden kann. Ausschlaggebend für die Pegelsenkung sind die Länge des Schalldämpfers und das Verhältnis von schallabsorbierendem Umfang zum freien Leitungsquerschnitt [VDI 2081]. In Wohnungslüftungsanlagen werden vorwiegend Rohrschalldämpfer verwendet, während in Büro- und Verwaltungsbauten mit größeren raumlufttechnischen Anlagen hingegen Kulissenschalldämpfer benutzt werden.

Die Strömungsgeschwindigkeit ist ausschlaggebend für die Geräuscentwicklung in luftführenden Rohren. Durch eine Begrenzung des Volumenstroms im Luftleitungssystem kann eine Pegelminderung herbeigeführt werden. Diese Maßnahme muss jedoch in Abstimmung mit der hydraulischen Auslegung des Kanalnetzes getroffen werden. Die Bestimmung des Schalleistungspegels in geraden Luftleitungen ist zudem vom Leitungsquerschnitt abhängig und wird nicht von der Länge des Kanals beeinflusst. In [VDI 2081] sind Berechnungsformeln für die Schalleistungspegel verschiedener Komponenten wie Abzweigungen, Umlenkungen und Drosselklappen sowie Schallpegelminderungen durch die Auskleidung mit absorbierenden Materialien genannt.

In Rohrleitungen müssen Resonanzen, die andere Strukturen zum Schwingen anregen, vermieden werden. Dabei sind vor allem die Eigenfrequenzen zu beachten. Die Schallausbreitung zwischen zwei benachbarten Räumen, auch als Telefoneschall bekannt, kann durch den Einsatz von Rohrschalldämpfern vermindert werden [VDI 3733].

Die Luftschalldämmung der Außenbauteile sollte durch den Einbau von Lüftungsgeräten oder Außenwanddurchlässen (ALD) nicht verschlechtert werden. Dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung sind meist eingehaust, führen aber durch die Nähe des Ventilators zum Raum zu höheren Schalleistungspegeln. In Untersuchungen nach [Pietruschka et al. 2011] werden außenwandintegrierte Einzelraumlüftungsgeräte am problematischsten gesehen, da der Einbau in die Außenwand die Luftschalldämmung der Außenwand stark verschlechtert. Der zulässige Schalldruckpegel für Lüftungsanlagen in schutzbedürftigen Räumen, wie Wohn- und Schlafräumen, darf nach [DIN 4109] den Anforderungswert von $L_{AFmax} \leq 30 \text{ dB(A)}$ nicht überschreiten. Bei Lüftungstechnischen Anlagen mit Dauergeräuschen ohne auffällige Einzeltöne sind um 5 dB(A) höhere Schalldruckpegel zulässig. In [VDI 4100] werden verschiedene Schallschutzstufen (SSt I-SSt III) definiert, deren Grenzwerte für den Schalldruckpegel L_{AFmax} in Aufenthaltsräumen teils über die bauaufsichtlich geforderten Anforderungswerte nach [DIN 4109] hinausgehen. Die Schallschutzstufen sowie die Anforderungswerte gemäß [VDI 4100] sind im Anhang in Tab. A 3 nach [Heinz 2011] dargestellt.

Zur akustischen Wirkung von fassadenintegrierten Luftkanalsystemen sind mehrere Effekte zu nennen, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Die Schalldämmung der Außenwand kann durch den Wanddurchbruch beim Anschluss des dämmstoffintegrierten Luftkanals an den Innenraum geschwächt werden. Das Schalldämmmaß der Wand ist eine frequenzabhängige Größe, die sich durch das Anbringen eines WDVS ändert. Hierbei verhalten sich die Außenwand und die Dämmschicht wie ein Feder-Massesystem mit einer Verschlechterung der Schalldämmung im Bereich der Resonanzfrequenz. Durch die richtige Wahl der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht kann der Einbruch der Schalldämmung außerhalb des bauakustisch relevanten Frequenzbereichs verlagert werden. Werden zwei Räume von benachbarten Wohneinheiten mit einem Lüftungskanal versorgt, so ist auf die Schall-Längsdämmung zwischen diesen Räumen zu achten. Die Schalldämpfung D zwischen zwei übereinanderliegenden Räumen, die durch einen dämmstoffintegrierten Luftkanal verbunden sind, kann über die Gleichung (2.10) nach [Piening 1937] angegeben werden.

$$D = 1,5 \cdot \alpha \cdot \frac{U}{S} \cdot l \quad (2.10)$$

Bei üblichen Geschosshöhen (2,75 m), einem Verhältnis von Umfang zu Kanalquerschnitt von beispielsweise 73 m^{-1} und Absorptionsgraden des Polystyrols im Bereich von 0,1-0,2 ergeben sich Einfügungsdämpfungsmaße von etwa 30 dB [Hauser und Kaiser 2013]. Diese Werte liegen jedoch höher als die resultierende Schalldämmung der Lüftungsöffnungen. Vor Eintritt in den Empfangsraum muss die Mündungsreflexion am Luftauslass berücksichtigt werden, sodass sich die Schalldämpfung insbesondere im tieffrequenten Bereich nochmals verbessert.

2.3.4 Hygienische Aspekte

Eine raumluftechnische Anlage in Wohngebäuden kann nur zu einem gesunden Raumklima mit hoher Innenluftqualität beitragen, wenn hygienische Aspekte bei der Planung, der Herstellung, während des Betriebes, der Wartung und der Instandsetzung der Lüftungsanlage berücksichtigt werden. Wichtige Hinweise dazu sind im technischen Regelwerk [VDI 6022] zu finden. Die Anforderungen zielen darauf ab, dass die Luftqualität der raumluftechnischen Anlage mindestens der Qualität der *„gesundheitlich zuträglichen Außenluft entspricht“* beziehungsweise diese nicht verschlechtert. Die luftberührten Bauteile und Komponenten der Lüftungsanlage müssen so konzipiert und instandgehalten werden, dass die Vermehrung von Mikroorganismen vermieden wird und keine *„zusätzliche Belastung durch Schadstoffe sowie anorganische und organische Verunreinigungen“* entsteht. Diese Gefahr ist beispielsweise gegeben, wenn Luft innerhalb der Leitungsführung bis zur Taupunkttemperatur abgekühlt wird und Tauwasser ausfällt. Aus diesem Grund muss im Bereich des Wärmeübertragers am Lüftungsgerät, wo durch den Wärmeentzug der warmen, feuchten Abluft Tauwasser entstehen kann, ein geeigneter Kondensatablauf angebracht werden.

Ob eine hohe Innenluftqualität erreicht wird, entscheidet sich schon bei Planung und Errichtung der Lüftungsanlage. So sollte auf eine richtige Dimensionierung und Auslegung des Lüftungsgeräts sowie der Außenluftvolumenströme für die einzelnen Räume des Gebäudes geachtet werden. Die luftführenden Kanäle und deren Geometrie sollten so ausgestaltet werden, dass Anhaftungen von Verunreinigungen vorgebeugt wird [VDI 6022]. Dies kann mit glatten Kanaloberflächen und runden bzw. ovalen Querschnitten ohne scharfe Umlenkungen und Rücksprünge erreicht werden. Des Weiteren sollte die Außenluftansaugung möglichst nicht auf einer Gebäudeseite mit hoher Feinstaubbelastung beispielsweise durch Straßenverkehr erfolgen. Durch den Einsatz von Luftfiltern in der Frischluftkanalführung können der Eintrag von Stäuben, Pollen und *„luftgetragenen Mikroorganismen“* in die Innenräume minimiert sowie die nachfolgenden Lüftungskomponenten wie Wärmeübertrager und Ventilatoren vor Verunreinigung geschützt werden. Vor der Inbetriebnahme der Anlage ist die Sauberkeit aller Bauteile und Oberflächen zu prüfen.

Während des Betriebs einer raumluftechnischen Anlage kann es zu Funktionseinschränkungen einzelner Lüftungsbauteile durch Beschädigung oder Verschmutzung kommen. Zur Kontrolle der ordnungsmäßigen Arbeitsweise müssen die Komponenten der Lüftungsanlage in unterschiedlichen Zeiträumen inspiziert und kontrolliert werden können. Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Zugänglichkeit aller Bauteile gegeben ist. Die Bauteile herkömmlicher Lüftungszentralgeräte wie Ventilatoren, Wärmetauscher und Filterkassetten können aufgrund der modularen Bauweise leicht geprüft werden. Das Luftleitungsnetz muss jedoch so ausgelegt sein, dass alle Innenflächen der Abschnitte und Teilkanäle gewartet und gegebenenfalls gereinigt werden können. Dies kann durch die Anordnung von Revisionsöffnungen in ausreichender Anzahl und Größe ermöglicht werden. In [DIN EN 12097] sind Anforderungen und Empfehlungen für die Platzierung solcher Zugangsdeckel für Luftkanalsysteme aufgeführt. So sollten die Teilkanäle nicht weiter als 7,5 m von einer Revisionsöffnung entfernt liegen mit höchstens einer Richtungsänderung von mehr als 45°. Bei Inbetriebnahme der raumluftechnischen Anlage ist nach [VDI 6022] eine Erstinspektion vorzunehmen, die dann bei Anlagen ohne Befeuchtung im

Abstand von drei Jahren wiederholt werden muss. Die Hygieneinspektion beinhaltet eine Sichtprüfung aller luftberührten Bauteile auf Verschmutzung und Beschädigung, eine mikrobiologische Untersuchung der Luftfilter durch Abklatschproben sowie eine Dokumentation der Wartung. Entsprechende Leitlinien und Protokolle für Inspektionen von Lüftungsanlagen sind beispielsweise in [DIN EN 15239] zu finden. Die notwendigen Tätigkeiten für die Hygieneinspektion aller Komponenten sind in [VDI 6022] dargestellt und werden nachfolgend nur beispielhaft für Lüftungsleitungen aufgezeigt. Luftleitungen müssen alle zwölf Monate visuell auf Beschädigungen, Verschmutzungen, Korrosion bei metallischen Oberflächen und auf möglichen Wasserniederschlag überprüft werden. [DIN 1946-6] gibt für die Augenscheinlichkeits- und Funktionskontrolle über den Zustand des Luftleitungsnetzes ebenfalls einen jährlichen Turnus an.

Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle müssen an geeigneten Stellen im Luftkanalnetz inspiziert und gereinigt werden können. Dies ist durch die Anordnung von Revisionsöffnungen im Fassadenbereich nur schwer zu realisieren. Die vertikal verlaufenden Kanäle können beispielsweise über den Wanddurchbruch an der Eintrittsöffnung in den Raum zugänglich gemacht werden. Die Reinigung der Kanäle kann entweder mechanisch oder mit Druckluft durchgeführt werden. Für die mechanische Reinigung ist ein geeigneter Bürstenkopf zu entwickeln, der die Kanaloberfläche nicht beschädigt und den Flachkanalquerschnitt gleichmäßig säubert. An entgegengesetzter Stelle im Kanalnetz kann dann die Verschmutzung mit einer leistungsstarken Staubfalle entfernt werden.

2.3.5 Brandschutztechnische Aspekte

Generell unterscheidet man zwischen brandschutztechnischen Anforderungen, die an Baustoffe, und jene, die an Bauteile gestellt werden. Baustoffe werden nach ihrem jeweiligen Brandverhalten in Baustoffklassen unterteilt. Hierbei wird zwischen nichtbrennbaren Materialien, schwerentflammbaren Baustoffen, normalentflammbaren Baustoffen und leichtentflammbaren Baustoffen unterschieden. Nach [DIN 4102-1] und [DIN EN 13501-1] wird eine Klassifizierung in Baustoffklassen vorgenommen. In der Bauregelliste des DIBt [DIBt 2013] werden die klassifizierten Eigenschaften zum Brandverhalten von Baustoffen beider Normen gegenübergestellt. Bauteile werden brandschutztechnisch in Feuerwiderstandsklassen eingeteilt. Der Feuerwiderstand beschreibt dabei die Zeit, während der ein Bauteil im Brandfall seine Eigenschaften erhält. Man unterscheidet eine Feuerwiderstandsdauer von 30 min (feuerhemmend), 60 min (hochfeuerhemmend) und 90 min (feuerbeständig) für die Funktionen Tragfähigkeit (R), Raumabschluss (E), Wärmedämmung (I) und mechanische Beanspruchung (M), die mit entsprechenden Buchstaben gekennzeichnet werden [DIN EN 13501-2].

Die Anforderungen an den baulichen und anlagentechnischen Brandschutz von Wohngebäuden und deren gebäudetechnische Anlagen sind in der Musterbauordnung [ARGE Bau 2008] bzw. den Landesbauordnungen der Bundesländer geregelt. Demnach sind nach § 14 „*bauliche Anlagen [...] so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.*“ [ARGE Bau 2008]. Speziell raumlufttechnische Anlagen müssen nach § 41 „betriebsicher und brandsicher“ sein. Diese recht allgemeingehaltene Anforderung wird in Absatz 2 des gleichen Paragraphen für Lüftungsleitungen jedoch etwas präziser formuliert. So

müssen „*Lüftungsleitungen sowie deren Bekleidungen und Dämmstoffe [...] aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen*“ und brennbare Baustoffe sind dann zulässig, „*wenn ein Beitrag der Lüftungsleitung zur Brandentstehung und Brandweiterleitung nicht zu befürchten ist*“. Konkrete Handlungsanweisungen für die Ausführung der Kanalführung können daraus nicht abgeleitet werden.

Genauere brandschutztechnische Bestimmungen zu Lüftungsanlagen und deren Bestandteilen, wie beispielsweise die Lüftungsleitungen, sind in der Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie (M-LüAR) [ARGE Bau 2010] zusammengestellt. Diese technische Baubestimmung, die von der Bauministerkonferenz herausgegeben wird, liefert die Anforderungen, die in § 41 der Musterbauordnung gestellt werden. Wie bereits oben beschrieben, sind schwerentflammbare Baustoffe für Lüftungsleitungen zulässig, wenn bestimmte Randbedingungen beachtet werden. Nach Lüftungsanlagenrichtlinie [ARGE Bau 2010] ist die Verwendung von schwerentflammbaren Baustoffen zulässig für [...]

- 1. Lüftungsleitungen, die nicht durch Bauteile hindurchgeführt werden, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit aus Gründen des Raumabschlusses vorgeschrieben ist,*
- 2. Lüftungsleitungen mit Brandschutzklappen am Durchtritt durch Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit aus Gründen des Raumabschlusses vorgeschrieben ist; die Brandschutzklappen müssen mindestens feuerhemmend sein; die höheren Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit aufgrund der Abschnitte 4 bis 6 bleiben unberührt oder*
- 3. Lüftungsleitungen, die mindestens feuerhemmend sind (schwerentflammbare Baustoffe, jedoch nur für die innere Schale) sowie für Lüftungsleitungen, die in einem mindestens feuerhemmenden Schacht verlegt sind; die höheren Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit aufgrund der Abschnitte 4 bis 6 bleiben unberührt. [...] [ARGE Bau 2010].*

Absperrvorrichtungen wie Brandschutzklappen, die Lüftungsabschnitte voneinander trennen, müssen die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen wie die Bauteile, die von den Lüftungsleitungen durchdrungen werden. Die Klassifizierung der Brandschutzklappe erfolgt dabei mit der Kennzeichnung K zusammen mit der jeweiligen Feuerwiderstandsdauer. Diese gilt auch für den Fall, wenn raumabschließende Bauteile wie beispielsweise Außenwände oder Decken durchdrungen werden.

In Lüftungszentralgeräten mit Wärmerückgewinnung muss nach [ARGE Bau 2010] dafür gesorgt werden, dass keine Brandübertragung zwischen Zuluft- und Abluftstrom stattfinden kann. In herkömmlichen rekuperativen Plattenwärmeübertragern werden die Luftströme voneinander getrennt vorbeigeführt. Lüftungsgeräte mit Ventilatoren oder Luftaufbereitungseinrichtungen, die in Strömungsrichtung über Lüftungsleitungen mehrere Brandabschnitte und Geschosse versorgen, müssen in einem separaten Raum, einer sogenannten Lüftungszentrale, aufgestellt werden. Dieser Raum darf keine andere Nutzung aufweisen. Wände, Decken und Fußböden müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und die raumabschließenden Wände der Lüftungszentrale zu anderen Räumen müssen hochfeuerhemmend sein.

Ein Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung ist unter Einbeziehung brandschutztechnischer Aspekte durchaus realisierbar, sofern bestimmte Kriterien bei der Umsetzung beachtet werden. In [Peikos 2013] werden für die Anwendung des Lüftungssystems mit

dämmstoffintegrierter Luftkanalführung im Mehrgeschosswohnungsbau kritische Punkte identifiziert und erläutert sowie notwendige brandschutztechnische Maßnahmen entwickelt. Diese Aspekte beziehen sich auf die Anbindung zweier Räume benachbarter Wohnungen über einen gemeinsamen Lüftungskanal. Hier muss die Rauchweiterleitung und der Brandüberschlag durch geeignete Brandschutzklappen im Außenwandbereich verhindert werden. Das WDVS muss in Gebäuden der Gebäudeklasse 4 mindestens schwerentflammbar ausgeführt werden. Fassadendämmungen aus EPS-Hartschaumplatten ab einer Dämmschichtdicke über 100 mm benötigen zum Erhalt der Schwerentflammbarkeit zusätzliche Brandschutzmaßnahmen in Form eines Brandschutzriegels oder eines Sturzschatzes über jedem Fenster. Die Luftkanalführung muss daher so angeordnet werden, dass die Schutzwirkung des Brandriegels nicht beeinträchtigt wird.

2.3.6 Komfortaspekte

Durch den Einsatz raumluftechnischer Anlagen lässt sich das Innenraumklima in Gebäuden verbessern und es kann eine Wohnkomfortsteigerung für die Bewohner erreicht werden. Dies ist entscheidend, um die Akzeptanz von Lüftungssystemen zu stärken und einer Fehlbedienung des Nutzers oder gar einem dauerhaften Abschalten der Anlage vorzubeugen. Die von der Lüftungsanlage direkt beeinflussbaren Größen für das Wohnraumklima sind die Raumluf-temperatur, die relative Luftfeuchte, die Art der Luftbewegung und der Schalldruckpegel im Raum.

Als Beurteilungsgröße für das Wohlbefinden des Menschen in Innenräumen wird die thermische Behaglichkeit verwendet. Diese beschreibt das Wärmeempfinden des Menschen gegenüber der Umgebung. Ein hohes Maß an Zufriedenheit ist dann erreicht, wenn sich der Wärmehaushalt des Menschen im Gleichgewicht befindet und der Mensch „weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluf wünscht“ [DIN 1946-2]. Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit erfolgt nach der Behaglichkeitsgleichung von [Fanger 1994] gemäß [DIN EN ISO 7730: 2006-05]. Die berechnete Klimabeurteilungsgröße (PMV⁷) ist ein Einzahlwert (zwischen -3 bis +3) und beschreibt den von einer großen Personengruppe vorhergesagten Durchschnittswert der Klimabewertung (siehe Anhang Tab. A 4). Aus dem berechneten PMV-Wert kann anschließend der Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD⁸) aus einer großen Personen-Gruppe bestimmt werden.

Die Lufteinbringung in den Raum erfolgt normalerweise über Tellerventile und kann bei zu hohen Luftgeschwindigkeiten zu Beeinträchtigungen und lokaler Unbehaglichkeit infolge von Zugluft führen. Das Zugluftisiko, als Prozentsatz an Unzufriedenen, kann nach [DIN EN 7730] über die mittlere Luftgeschwindigkeit, die Lufttemperatur und den Turbulenzgrad bestimmt werden und sollte einen Wert von 20 % nicht überschreiten [DIN 1946-6]. Zuluftventile im Wohnungsbau werden vorwiegend über einen Wandeinbau realisiert und selten im Decken- oder Fußbodenbereich angebracht. Die Anordnung der Zuluftdurchlässe auf der Außenwandseite in Fensternähe bietet den Vorteil, dass die einströmende Luft durch die am Heizkörper aufsteigende Luft etwas vorgewärmt wird und ein Kaltluftabfall in den Raum verhindert wird. Bei der Lufteinbringung auf

⁷ PMV: englisch: Predicted Mean Vote, vorausgesagtes mittleres Votum

⁸ PPD: englisch: Predicted Percentage of Dissatisfied, vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen

der Innenwandseite können je nach Raumtiefe Weitwurfdüsen eingesetzt werden. Dabei sollte ein Mindestabstand zur Deckenfläche eingehalten werden, um ein zu starkes Anliegen des Zuluftstrahls und eine mögliche Verschmutzung an der Deckenseite zu vermeiden [Heinz 2011].

Die relative Luftfeuchte der Raumluft hat einen großen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit des Menschen. Nach [DIN 1946-2] wird empfohlen, eine relative Luftfeuchte von 65% und einen absoluten Feuchtegehalt der Luft von 11,5 g/kg nicht zu überschreiten. Des Weiteren sollte die relative Luftfeuchtigkeit unabhängig von der Lufttemperatur nicht unter die Grenze von 30 % fallen. Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Raumlufttemperatur und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit können im Behaglichkeitsfeld nach [Leusden und Freymark 1951] dargestellt werden.

Sinkt die relative Luftfeuchtigkeit dauerhaft auf Werte unter 30 % ab, so nimmt die Staubbelastung zu und für die Bewohner steigt das Risiko von Konzentrationsmangel und Atemwegsreizungen. Dieser Zustand kann in Wohnungen mit einer zentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung dann auftreten, wenn über einen längeren Zeitraum sehr kalte Außenlufttemperaturen auftreten. Durch eine leichte Reduzierung der Zuluftmenge oder zusätzliche Feuchtequellen in den Wohnräumen, wie beispielsweise Zimmerpflanzen, können zu niedrige Luftfeuchten vermieden werden [Feist 2006]. Relative Luftfeuchten über 70 % führen zu einem unbehaglichen Innenraumklima und erhöhen die Gefahr des Tauwasseranfalls an thermischen Schwachstellen und Bauteilanschlüssen.

Das Lüftungssystem sollte regelbar sein und Eingriffsmöglichkeiten des Nutzers wie eine kurzzeitige Intensivlüftung oder eine bedarfsgerechte Dosierung der Luftmengen bei Abwesenheit zulassen. Mit einer einfach zu handhabenden Steuerung kann die Bedienung für die Bewohner erleichtert werden. Die Wartung und Inspektion der einzelnen Komponenten der Lüftungsanlage wie der Filterwechsel und die Reinigung der Kanäle sollte möglichst an zentraler Stelle und mit geringem Aufwand durchführbar sein.

Speziell für Systeme mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen sollte darauf geachtet werden, dass die Temperatur der Zuluft über das Luftkanalnetz auf der Fassade nicht zu stark absinkt, um das Zugluftrisiko zu minimieren und eine ausreichende thermische Behaglichkeit zu gewährleisten. Generell sind durch die Anordnung der luftführenden Kanäle auf der Fassade für ein zentrales Lüftungssystem keine weiteren zusätzlichen Aspekte zu erwarten, die sich negativ auf das Wohnraumklima auswirken können.

2.4 Übersicht bautechnischer Sanierungslösungen mit Einbindung von Lüftungstechnik

Im Allgemeinen werden Maßnahmen zur energetischen Sanierung von Gebäuden nacheinander und getrennt nach Gewerken ausgeführt. Sie sind meist schlecht aufeinander abgestimmt, sodass es zu bauphysikalischen Problemen wie Wärmebrücken oder mangelhafter Luftdichtheit im Bereich von Bauteilanschlüssen kommen kann [Stiegel und Krause 2012]. Eine höhere Qualität bei Sanierungen kann erzielt werden, wenn die anstehenden Arbeiten logistisch sinnvoll geplant und koordiniert werden.

Dies gelingt bei Komplettmodernisierungen, wenn das gesamte Objekt leer steht und alle Arbeiten von einem Bauunternehmen durchgeführt werden. Dazu muss das Gebäude jedoch komplett entmietet werden, mit der Gefahr, dass die ursprüngliche Mieterstruktur nicht erhalten bleibt. Investoren, die neben der energetischen Sanierung zusätzliche Maßnahmen wie neue Balkone, hochwertige Badausstattungen und weitere Aufwertungen dieser Gebäude vorsehen, versprechen sich, beim Verkauf der Immobilie höhere Renditen erzielen zu können. Dieses Phänomen ist vorwiegend in Metropolen vorzufinden und auch unter dem Begriff Gentrifizierung⁹ bekannt. Der hohe Kostendruck bei Erneuerungen im Mehrgeschosswohnungsbau, teilweise ungünstige Eigentumsverhältnisse sowie die individuelle Planung der Sanierungsmaßnahmen für jedes einzelne Gebäude erfordern technische Innovationen und neuartige Systeme. Mögliche Ansätze zeichnen sich meist durch einen modularen Aufbau aus und generieren mithilfe von multifunktionalen Konzepten einen Mehrwert beispielsweise durch die Installation anlagentechnischer Systeme zur Deckung des Restheizwärmebedarfs und der Trinkwarmwasserbereitung.

Um eine komplette Entmietung des Gebäudes zu verhindern, muss die Beeinträchtigung der Bewohner bei umfangreichen Modernisierungen auf ein Minimum reduziert werden. Mit dem Einsatz vorgefertigter, multifunktionaler Systeme für die energetische Sanierung können Fassadenmodule unter Werkstattbedingungen hergestellt und erst bei der Endmontage an der Baustelle verbaut werden. Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Kassel wurde in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekt ein vorgefertigtes multifunktionales Fenstermodul zur energetischen Sanierung entwickelt [Krause et al. 2013]. Das Fenster wird werkseitig vorgefertigt und mit einer umlaufenden Holzzarge und einem Dämmstoffkranz versehen. Kritische Anschlussdetails zur Luftdichtheit und Wärmebrückenproblematik werden direkt bei der Herstellung in der Werkstatt gelöst. Das Fenstermodul bietet den Vorteil, dass unterhalb des Fensters in einer speziellen Technikbox anlagentechnische Komponenten zur nachträglichen Sanierung der Heizungs- und Lüftungstechnik, wie Leitungsführungen für Heizungs- und Lüftungstechnik oder eine neue Elektroverteilung, angeschlossen werden können. Dadurch kann eine höhere Qualität der Sanierungsmaßnahme erreicht werden und der Mehrfachnutzen der Technikbox kann ein kostengünstigeres System ermöglichen.

⁹ Gentrifizierung: „Aufwertung eines Stadtteils durch dessen Sanierung oder Umbau mit der Folge, dass die dort ansässige Bevölkerung durch wohlhabendere Bevölkerungsschichten verdrängt wird“ (<http://www.duden.de/rechtschreibung/Gentrifizierung>)

In den letzten Jahren wurden vermehrt Projekte mit vorgefertigten Bauteilen zur energetischen Sanierung umgesetzt. Die Vorfertigung von Modulen zur energetischen Sanierung bietet eine Reihe von Vorteilen. So werden die Montagezeiten für den Einbau deutlich verkürzt. Das bedeutet auch, dass beispielsweise Gerüststandzeiten, die Beeinträchtigung der Mieter durch Schmutz und Lärm und die Mietausfallzeiten für die Eigentümer deutlich verringert werden können. Aktive und passive Komponenten zur Solarenergienutzung sind bei den Modulen relativ einfach zu integrieren. Die Größe der Fassadenelemente unterscheidet sich hierbei erheblich. Großformatige Holztafelelemente wie bei der TESS-Energy-Fassade [Kobler et al. 2011] lassen sich zwar gut vorfertigen, eine Integration von Leitungsführungen und heizungs- und lüftungstechnischen Systemen ist jedoch nur mit erheblichem Aufwand realisierbar. So erfordert die Montage der Elemente ein genaues Ausmessen der kompletten Fassade, damit die Fassadenteile und die Anschlusspunkte der Leitungen passgenau miteinander verbunden werden können. Bei der Durchführung von Leitungen durch die Bestandswand sind brandschutztechnische Anforderungen insbesondere bei größeren Gebäuden zu beachten [IS-Argebau 2005].

Innerhalb des europäischen Forschungsprojekts iNSPiRe [Ochs und Dermentzis 2014] wird die Einbindung einer wohnungszentralen Lüftungsanlage mit Abwärmenutzung über eine Kleinstwärmepumpe in Holzrahmenelemente für die energetische Sanierung von Mehrfamilienhäusern entwickelt. Das Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager und alle Komponenten wie Schalldämpfer und Filter sind in der Holzkonstruktion integriert. Die größte Herausforderung bei der Umsetzung ist es, die Zugänglichkeit zu den Komponenten für Wartung und Inspektion zu gewährleisten und den Anschluss der Zu- und Abluftkanäle in die Wohnbereiche sicherzustellen.

Ein weiteres marktgängiges Fassadensanierungssystem mit großen vorgefertigten Elementen nutzt die passiven Solarenergiegewinne über eine Solarwabenfassade [GAP-Solution 2009]. Dabei wird das Prinzip der transparenten Wärmedämmung angewendet. Die tiefstehende Wintersonne dringt in die Solarwaben ein und wärmt diese auf. Im Sommerfall sorgt eine äußere Glasscheibe für eine Hinterlüftung der Fassade und die Solarwaben wirken wie ein außenliegender Sonnenschutz. Die einzelnen Module werden mit einer Holzunterkonstruktion an der Bestandsfassade montiert. Dazu muss die komplette Fassade insbesondere im Bereich der Anschlusspunkte an Fenstern und Balkonen vermessen werden. Die farbigen, transluzenten Elemente geben dem sanierten Gebäude ein völlig neues Erscheinungsbild, was im Bereich des Denkmalschutzes von Gebäudeensembles zu gestalterischen Problemen führen kann. Der hygienische Mindestluftwechsel wird bei diesem Sanierungssystem mit dezentralen Lüftungsgeräten realisiert, die direkt an der Fassade angebracht sind.

Bei der nachträglichen Installation zentraler Lüftungsanlagen müssen die notwendigen Kanäle üblicherweise im Gebäudeinneren verlegt werden. Dies ist in bewohnten Gebäuden nur mit unverhältnismäßig hohen Beeinträchtigungen der Nutzer möglich. Daher wird in einigen Sanierungsvorhaben die Luftkanalführung über die Fassade angeordnet. So werden nach [VisionAir 2011] die ovalen Flachkanäle mit Halteklammern aus Kunststoff an der Fassade montiert und die einzelnen Kanäle anschließend mit einem herkömmlichen Wärmedämmverbund-System überdämmt. Die Luftkanalverlegung und das Anbringen der Wärmedämmplatten werden dabei nacheinander in zwei Arbeitsschritten ausgeführt. Sie führen aufgrund der Anpassungen der Dämmplatten zu einem hohen Verschnitt und zu einem ungünstigen Fugenbild.

Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg wurde in Kooperation mit einem Industriepartner ein System entwickelt, bei dem die luftführenden Kanäle in einer Unterkonstruktion aus expandiertem Polystyrol mit Aussparungen eingesetzt werden. Die Kunststoffkanäle liegen somit in der Dämmebene und müssen in einem zweiten Arbeitsschritt überdämmt werden. Das Zuschneiden der Dämmplatten ist bei diesem System jedoch mit verhältnismäßig hohem Aufwand verbunden.

Bei der nachträglichen Installation einer zentralen Abluftanlage kann neben der Sicherstellung des Mindestluftwechsels gleichzeitig auch die Abwärmenutzung in einer Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung realisiert werden. Dazu liefert die Lüftungsanlage eine annähernd konstante Ablufttemperatur, sodass die Wärmepumpe mit gleichmäßig hohen Leistungszahlen arbeitet. Die zurückgewonnene Wärme kann dann in einem Trinkwarmwasserspeicher eingekoppelt werden. In Abb. 18 ist ein derartiges System dargestellt. Die Nutzung der Wärmerückgewinnung aus der Abluft ist mit einer Abluftwärmepumpe auch über ein zentrales Zu- und Abluftsystem möglich. In Abb. 19 ist ein solches Konzept veranschaulicht. Die Wärmepumpe kann neben der Trinkwarmwasserbereitung auch die Zuluft vorwärmen. Hierbei wird allerdings je nach Höhe des Restwärmebedarfs noch ein zusätzliches Heizungssystem benötigt.

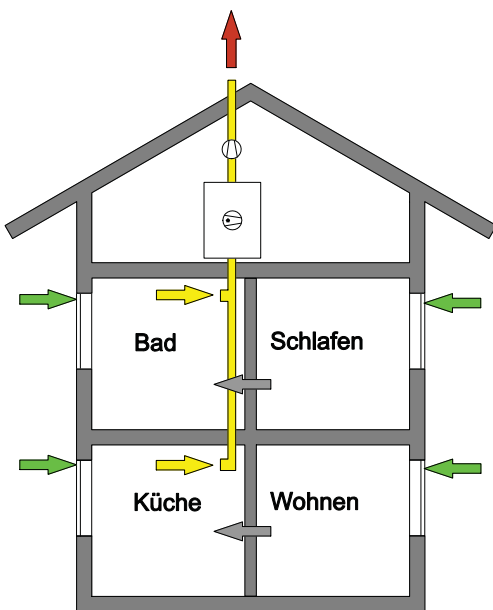


Abb. 18: Zentrale Abluftanlage mit Nutzung der Abwärme über eine Wärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung

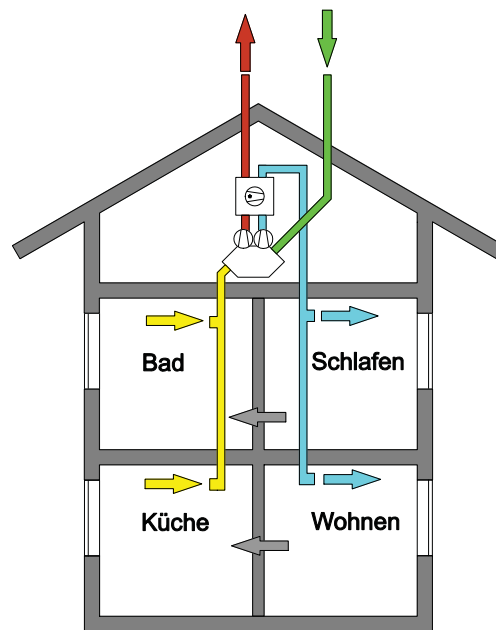


Abb. 19: Zentrale Lüftungsanlage mit WRG und Lüftungswärmepumpe zur Luftnachheizung und Trinkwarmwassererwärmung

Die derzeit in der Forschung untersuchten Sanierungslösungen, aber auch bereits marktfähige Systeme zur nachträglichen Ertüchtigung der Gebäudehülle mit Einbindung von lüftungstechnischen Komponenten können durch ihre Multifunktionalität und die Tiefe des Vorfertigungsgrads der Bauteile charakterisiert werden.

Große Fassadenelemente bieten genügend Platz, um anlagentechnische Systeme wie Lüftungsgeräte oder Wärmepumpen sowie Verkabelungen und luftführende Leitungen unter

standardisierten Werkstattbedingungen unabhängig von den Witterungsverhältnissen zu fertigen. Der Aufwand für die Montage nimmt jedoch mit dem Gewicht der Bauteile und der Komplexität der Anschlüsse an das bestehende Gebäude stark zu. Die erhöhte Logistik während des Sanierungsprozesses und die abzustimmenden Arbeiten können dabei den Vorteil der Vorfertigung nahezu kompensieren.

Wird bei Sanierungslösungen die Verlegung der Luftkanäle auf der Fassade mit der Montage des Wärmedämmverbund-Systems intelligent kombiniert, so unterscheidet sich der Montageaufwand im Vergleich zu einer alleinigen Anbringung der Wärmedämmplatten nur geringfügig. Wichtig ist hierbei, dass alle beteiligten Handwerksunternehmen wie Stuckateur, Fensterbauer und Dachdecker über das neuartige System geschult sind und der Anschluss der Luftleitungen sowie die Durchführung in das Gebäude luftdicht ausgeführt werden.

Eine hohe Marktdurchdringung neuer Sanierungslösungen wird sich nur dann einstellen, wenn die Gesamtkosten der Sanierungsmaßnahme nur unwesentlich höher ausfallen als für herkömmliche Systeme und außerdem ein Mehrwert durch die zusätzliche Energieeinsparung der Wärmerückgewinnung erzielt wird.

3 Voruntersuchungen an einem realen Bestandsgebäude

3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Inhalt dieses Kapitels ist die Analyse und Auswertung des Betriebsverhaltens eines Gebäudes, das im Rahmen eines Forschungsprojekts mit einem Sanierungssystem mit fassadenintegrierten Lüftungskanälen erneuert wurde. Dazu wurden über einen Zeitraum von drei Jahren Langzeitmessungen am Gebäude und dem dort installiertem Lüftungssystem erhoben, deren Messdaten in dieser Arbeit erstmals umfassend analysiert werden.

Ziel der Untersuchungen ist es herauszufinden, inwieweit die Luftkanalführung auf der Fassade die thermische Behaglichkeit und den energieeffizienten Betrieb der Lüftungsanlage beeinflusst und welche thermischen, energetischen und hydraulischen Kennwerte wie der Wärmerückgewinnungsgrad, die thermische Qualität der Zuluft und der Systemdruckverlust mit dem umgesetzten System erzielt werden können. Des Weiteren werden auch praktische Fragestellungen, wie die Reinigung und Inspektion der Luftkanäle, untersucht. Mithilfe dieser Methode werden dann die relevanten Einflussgrößen für die Leistungsfähigkeit des Systems bestimmt, um in einem weiteren Schritt Optimierungen für die Kanalführung auf der Fassade und weitere Gebäudeanwendungen auszuarbeiten. Die Ergebnisse aus diesem Kapitel werden im weiteren Verlauf der Dissertation dazu verwendet, um das thermisch-hydraulisch gekoppelte Simulationsmodell anhand der realen Messdaten zu validieren.

Zunächst werden das Demonstrationsgebäude in Kassel und das dort verbaute Lüftungssystem genau beschrieben und anschließend das Monitoringsystem für die Langzeitmessungen erklärt. Dazu wird die Lage der Messsensoren am Gebäude grafisch dargestellt und die einzelnen Messparameter für die spätere Auswertung aufgezeigt. Das Betriebsverhalten und die Funktionsweise des Lüftungssystems werden dann über die Analyse der Messdaten bestimmt und die Ergebnisse daraus zusammengefasst und bewertet.

3.2 Gebäudebeschreibung und Lüftungskonzept

Das neuartige Sanierungssystem mit fassadenintegrierten Lüftungskanälen wurde an einem freistehenden zweigeschossigen Wohnhaus mit zwei Wohneinheiten in Kassel-Harleshausen realisiert. Das Gebäude aus den 1920er Jahren wurde in Massivbauweise errichtet und besitzt einen unbeheizten Keller sowie ein nicht ausgebautes Dachgeschoss. Die beheizte Wohnfläche des Gebäudes beträgt 135,4 m² und das beheizte Raumvolumen 379,2 m³. Im Zuge der energetischen Sanierung des Gebäudes wurde die 300 mm dicke Ziegelaußenwand mit einer 160 mm starken Dämmstoffschicht aus expandiertem Polystyrol¹⁰ gedämmt und das Satteldach mit einer Aufsparrendämmung versehen sowie die Ziegeleindeckung erneuert. Die Außenansichten des Wohngebäudes vor und nach der Modernisierung sind in Abb. A 1 und Abb. A 2 im Anhang dargestellt. An der Heizungstechnik des Wohnhauses wurden keine Veränderungen vorgenommen. Der Öl-Niedertemperaturkessel aus dem Jahre 1996 ist im Keller aufgestellt und befindet sich wie die Verteilleitungen außerhalb der thermischen Hülle. Die

¹⁰ Neopor® - Dämmplatte WLS 032 siehe auch: http://bachl.de/uploads/media/NEOPOR-Daemmplatte_031_032.pdf

Wärmeübergabe in den Räumen beider Geschosse erfolgt über Radiatoren, die im Außenwandbereich angeordnet sind.

Vor der energetischen Sanierung des Gebäudes erfolgte der notwendige Luftaustausch durch natürliche Lüftung über Fenster und Türen. Das Lüftungskonzept nach der Dämmung der Gebäudehülle sieht die Installation einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung¹¹ vor. Das Lüftungscentralgerät steht im Heizungskeller und versorgt über eine horizontale Verteilleitung und einzelne senkrechte Zuluftkanäle die einzelnen Wohnräume beider Geschosse mit Frischluft. Die Abluft aus Küchen und Bädern wird jeweils über vertikale Leitungen und einer gemeinsamen Sammelleitung zum Lüftungsgerät zurückgeführt. In Abb. 20 und Abb. 21 ist die Kanalführung auf der Fassade des Gebäudes schematisch dargestellt. Jeweils zwei übereinanderliegende Räume werden mit einem Lüftungskanal erschlossen.

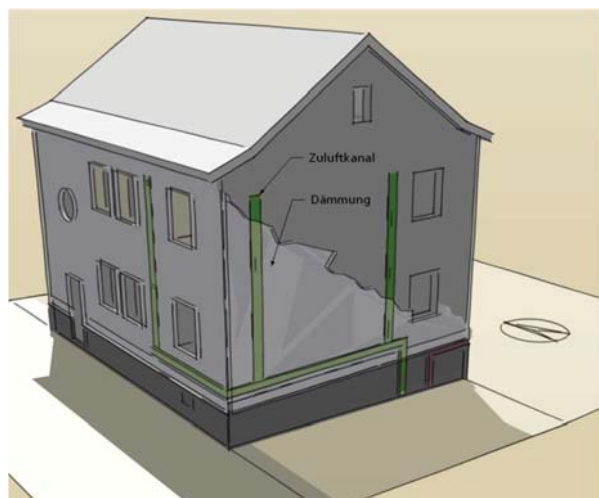


Abb. 20: Zuluftleitungen auf Süd- und Westfassade mit horizontalem Verteilkanal¹²

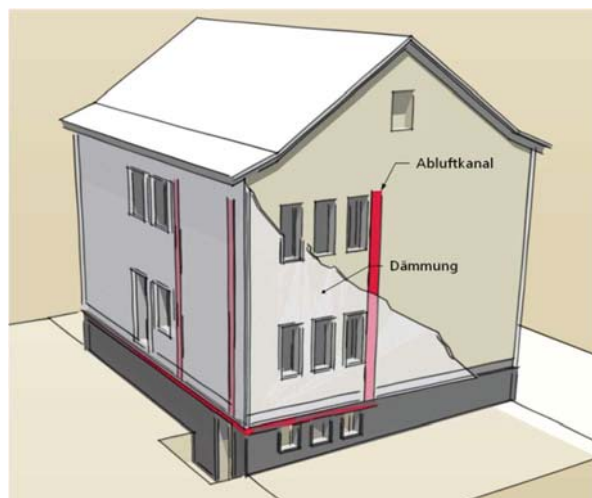


Abb. 21: Abluftleitungen auf Nord- und Ostfassade mit horizontalem Sammelkanal¹³

Die Ansaugung der Außenluft sowie der Fortluftaustritt befinden sich im Sockelbereich der Südfassade des Hauses. Das Lüftungscentralgerät mit Kreuz-Gegenstrom-Wärmetauscher weist laut Hersteller einen Wärmerückgewinnungsgrad von über 80 % auf [Heinemann 2013] und kann einen Gesamtvolumenstrom von maximal 300 m³/h liefern. Mit dem 4-Stufen-Regler kann die Steuerspannung an den Gleichstromventilatoren im Zuluft- und Abluftkanal eingeregelt werden, um die Luftmengen in den Räumen zu dosieren. Die Außenluftvolumenströme für beide gleich großen Wohnungen werden gemäß [DIN 1946-6] nach Nennlüftung ausgelegt. Die daraus resultierenden Volumenströme und Luftwechsel aller Räume sind in Tab. A 5 zu finden. Das Lüftungskonzept mit den Grundrissen des Demonstrationsgebäudes sowie den Zuluft- und Abluftbereichen der Wohnungen ist in Abb. 22 dargestellt. Die Wohn- und Schlafräume bilden den Zuluftbereich. Von dort strömt die Luft über den Flur in die Abluftzone (Küchen und Bäder). Der Abstellraum im Obergeschoss wird nicht belüftet.

¹¹ Vallox ValloMulti 300 siehe auch: <http://www.heinemann-gmbh.de>

¹² Grafik: Jan Kaiser, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Kassel

¹³ Grafik: Jan Kaiser, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Kassel

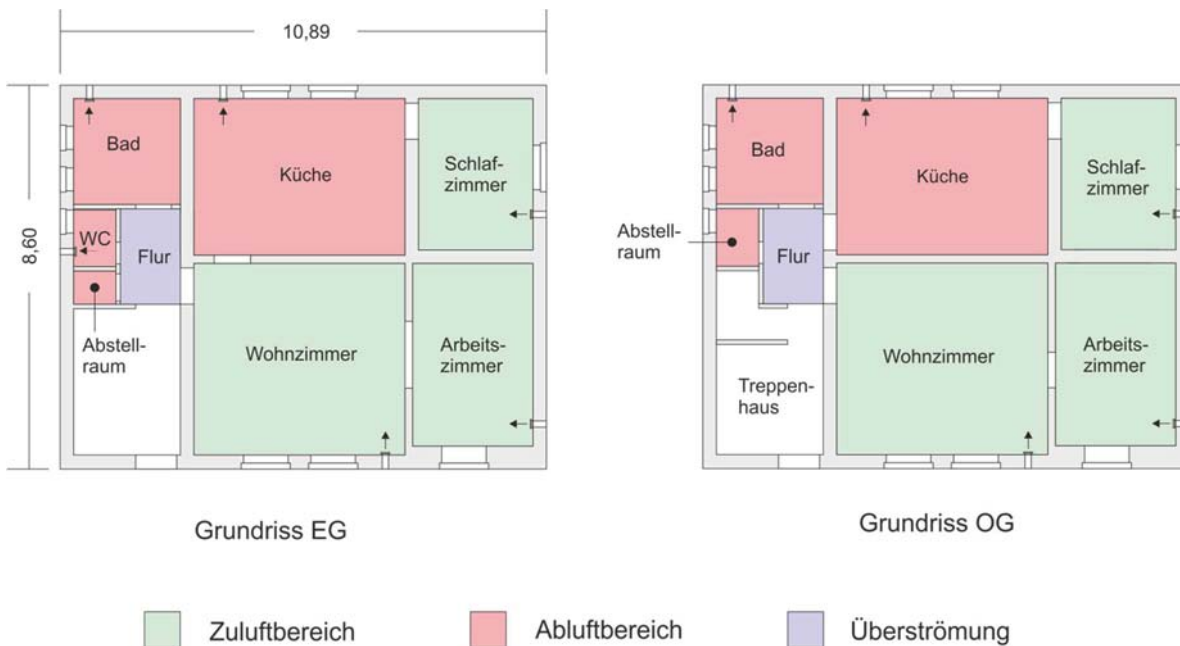


Abb. 22: Lüftungskonzept des Testgebäudes mit Zu- und Abluftbereichen beider Geschosse

3.3 Messtechnische Ausstattung

Um das Betriebsverhalten des Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung am Demonstrationsgebäude in Kassel in dieser Arbeit zu analysieren, werden die Messdaten eines umfangreichen Monitoringsystems genutzt, die im Rahmen eines industriell geförderten Forschungsprojekts über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren erhoben wurden. Die Messparameter und die daraus ableitbaren Erkenntnisse über die Funktion des Lüftungssystems sind in untenstehender Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Messparameter und Untersuchungszweck der Langzeitmessungen am Demonstrationsgebäude in Kassel

Messparameter	Untersuchungszweck
Lufttemperatur im Kanal an den Ein- und Auslässen der Wohnräume	Thermische Qualität der Zu- und Abluft Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungssystems
Lufttemperaturen am Lüftungsgerät	Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungsgeräts
Wärmestromdichte im Außenwand- und Kanalquerschnitt	Minderung des Wärmeschutzes der Außenwand im Bereich der Luftkanalführung
Relative Luftfeuchtigkeit an ausgewählten Stellen im Kanalnetz	Bewertung der Tauwasserausfallgefahr an kritischen Stellen des Luftkanalnetzes
Druckverlust im Zuluft- und Abluftkanalnetz	Hydraulische Bewertung der Kanalführung Pneumatischer Abgleich des Systems
Leistungsaufnahme der Ventilatoren	Elektrischer Hilfsenergiebedarf

Zur Messdatenaufnahme wurde das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte Messtechnik-Programmsystem IMEDAS¹⁴ eingesetzt. Die verwendeten Messkanäle werden in einem zentralen Mess- und Verteilerschrank im Heizungskeller des Gebäudes zusammengeführt und können per Fernzugriff ausgelesen werden. Eine Liste der verwendeten Messsensoren und der zugehörigen Messstellen sind im Anhang in Tab. A 6 zusammengestellt. Das Schema des Lüftungssystems mit den Messsensoren und deren Lage ist in Abb. 23 zu sehen.

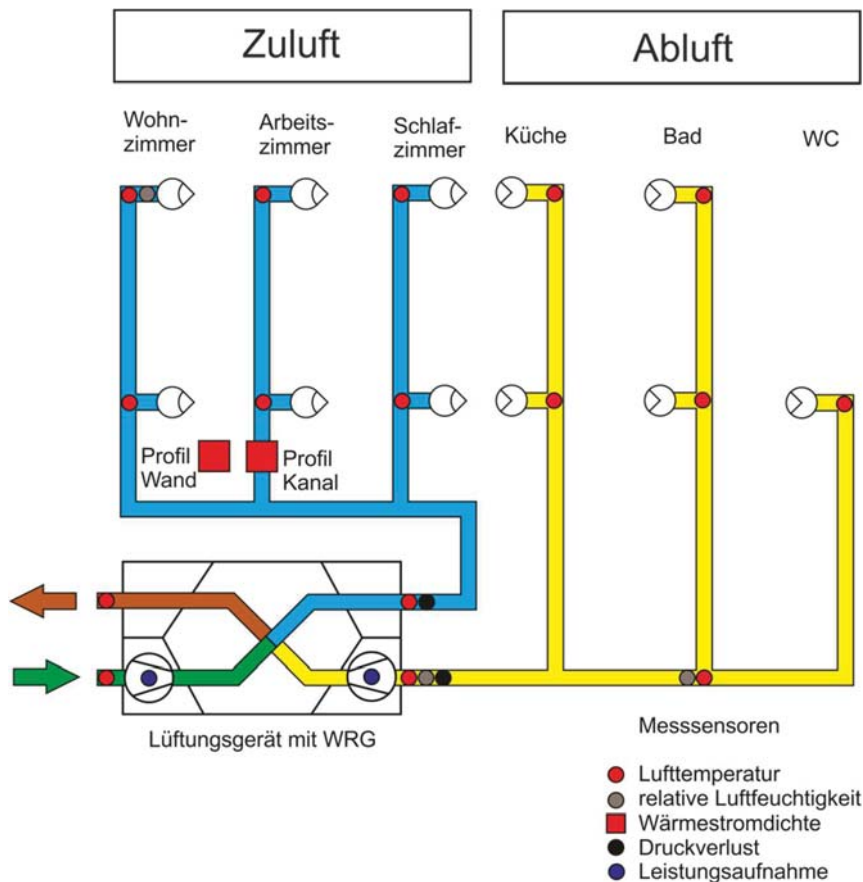


Abb. 23: Schema des Lüftungssystems und Lage der Messsensoren am Demonstrationsgebäude

Die Lufttemperaturen in den Lüftungskanälen werden vor Eintritt in die Zulufräume, am Austritt der Ablufträume sowie an der Warm- und Kaltseite am Ein- und Austritt des Lüftungsgeräts gemessen. Damit ist es möglich, die Temperaturentwicklung im Zuluft- und Abluftkanalstrang zu analysieren. Um die Gefahr eines möglichen Tauwasserausfalls insbesondere im Abluftstrang zu bestimmen, wird an ausgewählten Stellen der Luftleitungsführung die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt. Eine Messstelle befindet sich in der horizontalen Sammelleitung im Abluftkanalnetz an der Zusammenführung des Bäderstrangs und der zweite Messpunkt ist direkt am Eintritt der Luft in das Lüftungsgerät. Zum Vergleich wird die relative Luftfeuchtigkeit auch am Eintritt in das Wohnzimmer im Obergeschoss gemessen. Am ungestörten Außenwandquerschnitt und auf Höhe des senkrecht verlaufenden Lüftungskanals im Zuluftstrang sind jeweils Wärmestromplatten angebracht, mit denen die zusätzlichen Wärmeabflüsse quantifiziert werden können. Mit der Messung der Gesamtdruckverluste bzw. der Druckerhöhung der Lüfter und der Bestimmung

¹⁴ IMEDAS: Internet Messwerterfassungs- und Datenauswertungs-System siehe auch: <http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/energiesysteme/projekte/fassadenkonzepte/imedas.html>

der elektrischen Leistungsaufnahme der beiden Ventilatoren kann der Hilfsstrombedarf der Lüftungsanlage ermittelt werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Wohnräume des Gebäudes wie folgt abgekürzt: Wohnzimmer (WZ), Arbeitszimmer (AZ) und Schlafzimmer (SZ).

3.4 Betriebsverhalten und Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der messtechnischen Analyse erläutert, mit denen erstmals das Betriebsverhalten sowie die energetische und hydraulische Leistungsfähigkeit des Lüftungssystems mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen detailliert beschrieben werden können. Mithilfe der Auswertung der Langzeitmessungen ist es nun möglich, die wirksamen Einflussfaktoren der Leitungsführung auf der Fassade für die Funktionsweise des Lüftungssystems zu identifizieren und in einem weiteren Schritt in dieser Arbeit Optimierungspotentiale für weitere Anwendungen des Systems zu heben. Erste Aussagen über das am Demonstrationsgebäude umgesetzte Lüftungssystem wurden bereits in [Ziegler 2010] und [Ziegler et al. 2013] dargestellt.

3.4.1 Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

Der einwandfreie Betrieb einer Zu- und Abluftanlage hängt maßgeblich von den richtig dimensionierten Volumenströmen in allen Räumen des Gebäudes ab. Dazu müssen die Luftmengen bei der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage gemäß der Auslegung nach [DIN 1946-6] in allen Zonen überprüft werden, um Disbalancen im System und eine Über- und Unterversorgung mit Frischluft in den Zonen zu vermeiden. So kann ein dauerhaft erhöhter Volumenstrom zu unbehaglichen Zuständen und Zuglufterscheinungen führen. Insbesondere bei Kanalnetzen, die über mehrere Geschosse eines Gebäudes verlaufen, können die Luftmengen in höher gelegenen Etagen aufgrund der längeren Leitungswege und den damit verbundenen höheren Druckverlusten deutlich geringer sein als in den unteren Räumen. Nur eine korrekt eingeregelter Anlage mit optimaler hydraulischer Verteilung führt zu einer energieeffizienten Funktionsweise mit hoher Wärmerückgewinnung und geringem Hilfsstrombedarf. Ähnlich wie bei wassergeführten Anlagen werden die Luftmengen mithilfe eines pneumatischen Abgleichs überprüft und nachgemessen.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen zeigt sich, dass die Gesamtdruckverluste im Abluftstrang deutlich über den Druckverlusten des Zuluftstranges liegen. Dies führt dazu, dass bei gleicher Drehzahl der beiden Ventilatoren die Zuluftmengen sehr viel höher sind als die Abluftvolumenströme. Da beide Lüfter mit dem gleichen Signal angesteuert werden, lassen sich die Luftmengen nicht ausbalancieren. Durch einen Eingriff in die interne Verdrahtung und den Einbau eines zweiten Reglers können beide Lüfter unabhängig voneinander angesteuert werden. Der Umbau der Regelung zum Einstellen der Lüfterstufen ist in [Ziegler 2010] dokumentiert. Für die Einregulierung wird der Zuluftventilator im mittleren Leistungsbereich auf der 7V-Kennlinie betrieben. Der Abluftventilator wird auf eine höhere Kennlinie (9V) im Kennlinienfeld eingestellt, um ausgeglichene Zu- und Abluftmengen zu erreichen. Die Lüfterstufen können nur sehr grob über das Potentiometer am 4-Stufen-Schalter einjustiert werden, sodass eine genaue Aussage über die Steuerspannung der Lüfter nicht möglich ist. Die Luftgeschwindigkeit an den Ein- und Auslässen der Räume wird mit einem Flügelradanemometer bestimmt. Dazu wird ein trichterförmiger Messkegel bündig über die Öffnung an der Wand gesetzt und der Sensor mittig

in den definierten Strömungsquerschnitt gehalten. Kleine Stellungsänderungen können die Messung bereits beeinflussen, sodass darauf geachtet werden muss, dass der Sensor möglichst zentral in den Messquerschnitt gehalten wird. Bei der Geschwindigkeitsmessung mit dem Flügelradanemometer können geringe Luftgeschwindigkeiten unter 1 m/s nicht erfasst werden.

Zum Einregulieren der Volumenströme werden alle Tellerventile an den Ein- und Auslässen der Räume vorübergehend entfernt und alle Türen in den beiden Wohnungen geöffnet. Die Luftmengen, die sich hierbei bei freier Verteilung einstellen, können später über Drosselungen an den Tellerventilen auf die Auslegungswerte angepasst werden. In Abb. 24 sind die gemessenen Volumenströme in beiden Geschossen bei freier Verteilung und mit angepassten Tellerventilen dargestellt. Der Vergleich der Luftmengen in den Geschossen zeigt, dass im Erdgeschoss aufgrund der kürzeren Leitungswege und den damit einhergehenden geringeren Druckverlusten deutlich höhere Volumenströme erreicht werden als im Obergeschoss des Gebäudes.

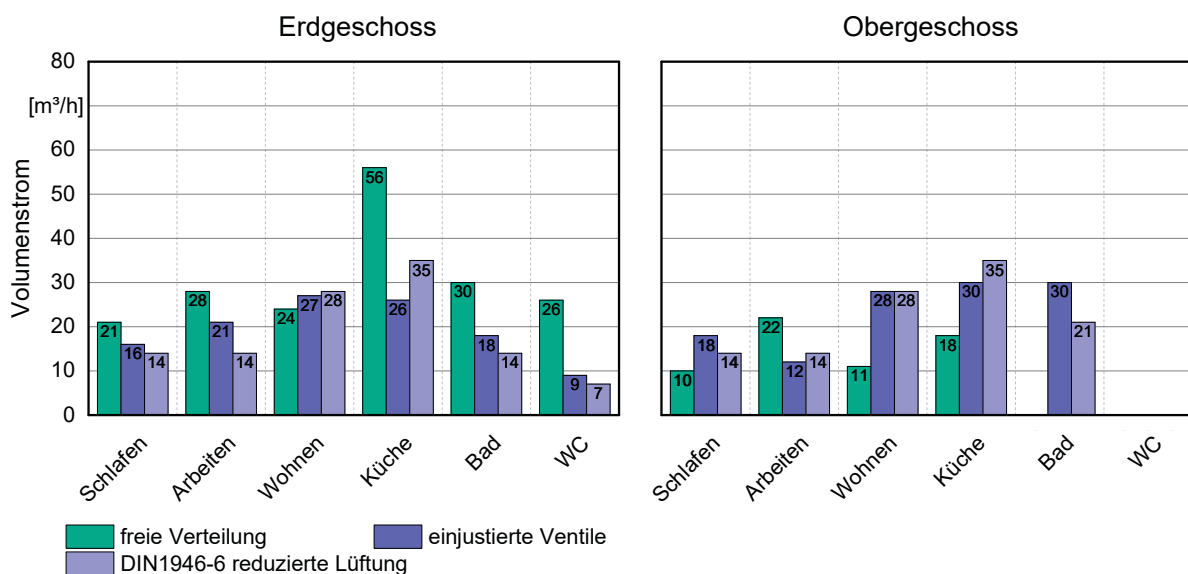


Abb. 24: Vergleich der gemessenen Volumenströme beider Geschosse bei freier Luftverteilung, mit angepassten Tellerventilen und den Auslegungswerten nach reduzierter Lüftung

Bei freier Luftverteilung sind große Unterschiede zwischen den einzelnen Strängen im Zuluft- und Abluftbereich festzustellen. So werden beispielsweise in den Küchen beider Geschosse höhere Luftmengen erreicht als in den Bädern und dem WC. Grund hierfür sind die längeren Kanalwege und höheren Druckverluste. Die Dosierung der Volumenströme gemäß der Kanalnetzrechnung erfolgt durch eine Drosselung am Tellerventil der entsprechenden Räume, indem der Kegelhub am Ventil verkleinert wird. Vergleicht man die angepassten Volumenströme nach der Druckverlustregelung in allen Räumen, so ist zu sehen, dass eine gleichmäßige Luftverteilung in den Zu- und Abluftbereichen erzielt wird. Am Beispiel der eingestellten Lüfterstufen im Zuluft- und Abluftstrang ist zu erkennen, dass die Auslegungsvolumenströme für reduzierte Lüftung eingestellt und abgeglichen werden können. Durch Erhöhung der Steuerspannung an den Ventilatoren ist es möglich, auch höhere Lüftungsstufen als Nennlüftung einzuregulieren.

3.4.2 Systemdruckverlust und Leistungsaufnahme der Ventilatoren

Eine detaillierte Analyse der Leistungsaufnahmen der beiden Ventilatoren und des Systemdruckverlusts im Zuluft- und Abluftkanalnetz erfolgt während der ersten Heizperiode im Zeitraum von September 2010 bis April 2011, siehe auch in [Ziegler 2010]. Dadurch ist es möglich, den Hilfsstrombedarf für die Lüftungsanlage zu bestimmen und die Funktionsweise der fassadenintegrierten Luftkanalführung bei unterschiedlichen Lüftungsstufen nachzuvollziehen. In den Übergangsmonaten im Herbst wird die Lüftungsanlage mit reduzierter Lüftung betrieben und der mechanische Gebäudeluftwechsel mit sinkender Außenlufttemperatur schrittweise erhöht. In Abb. 25 sind die elektrischen Leistungsaufnahmen des Zuluft- und Abluftventilators sowie die Druckverluste im Zuluft- und Abluftstrang während der Heizperiode aufgetragen.

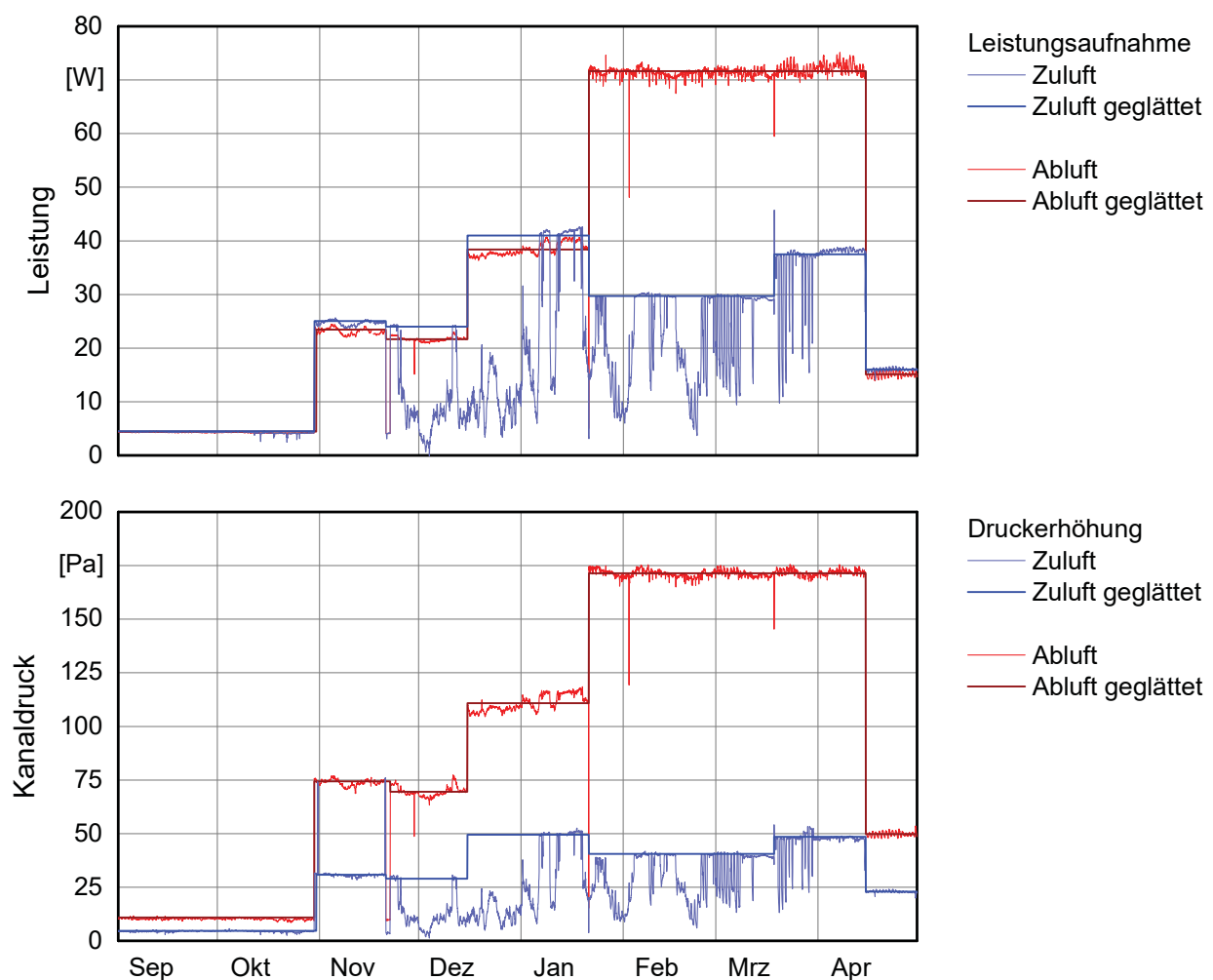


Abb. 25: Gemessener Druckverlust im Zuluft- und Abluftkanal und gemessene Leistungsaufnahme des Zuluft- und Abluftventilators während der Heizperiode 2010/2011

In den beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Druckverluste in den beiden Strängen proportional zur Leistungsaufnahme des jeweiligen Lüfters ansteigen. Die gemessenen Druckverluste im Abluftkanalnetz liegen deutlich über den Druckverlusten im Zuluftkanalnetz. Abluftseitig sind die Leitungswege zwar etwas länger (längster Abluftstrang: ca. 24 m im Vergleich zu 17 m im längsten Zuluftstrang), allerdings kann dies nicht den um das 2- bis 2,5-

fachen Kanaldruckverlust erklären. Leckagen im Abluftstrang können Grund für den erhöhten Systemdruckverlust sein, da die horizontale Sammelleitung, die auf Höhe des unbeheizten Kellers verläuft, während der Sanierung des Gebäudes nachträglich innenseitig gedämmt wurde. Bis Mitte Januar 2011 werden beide Lüfter über den gleichen 4-Stufen-Regler angesteuert. Die große Diskrepanz der hydraulischen Verteilung zwischen den Lüftungssträngen erfordert eine getrennte Anpassung der Volumenströme für Zu- und Abluft. Mit dem Einbau eines zweiten Reglers kann der Abluftventilator beispielsweise mit einer höheren Lüftungsstufe betrieben werden als der Zuluftventilator.

Zur Bestimmung des jährlichen Strombedarfs wird die elektrische Leistungsaufnahme für beide Ventilatoren über den Zeitraum mit gleicher Lüfterstufe gemittelt. Dies führt über die gesamte Heizperiode zu einem Stromverbrauch von 319 kWh. Dabei entfallen ca. zwei Drittel der Hilfsenergie auf den Abluftventilator und ein Drittel auf den Zuluftventilator. Die spezifische Ventilatorleistung (SFP) für den untersuchten Zeitraum beträgt $0,249 \text{ Wh/m}^3$ bzw. 897 Ws/m^3 und entspricht nach [DIN 13779] der Kategorie SFP 3. Unter der Voraussetzung, dass im Abluftkanalnetz der gleiche Systemdruckverlust und die gleiche Leistungsaufnahme am Ventilator anliegen würden, ergäbe sich ein geringerer SFP-Wert von ca. 740 Ws/m^3 , der die Kategorie SFP 2 erfüllt. Die gemessenen Leistungsaufnahmen beider Ventilatoren, die Außenlufttemperaturverläufe sowie die Temperaturverläufe der Abluft in beiden Küchen für alle drei untersuchten Heizperioden sind im Anhang in Abb. A 3 und Abb. A 4 dargestellt. Anhand der gemessenen Küchenablufttemperatur kann der Beheizungsgrad der Wohnung bzw. die Anwesenheit der Nutzer abgeschätzt werden. Diese Angaben sind für die Auswertung und Beurteilung der Messdaten hinsichtlich der Bestimmung wärmetechnischer und energetischer Kenngrößen des Lüftungssystems notwendig.

In Abb. 25 wird in den Wintermonaten ein Absinken der Leistungsaufnahme des Zuluftventilators deutlich. Dies ist auf die Gefrierschutzregelung am Zentralgerät zurückzuführen. Durch den Wärmeentzug der feuchten Abluft kann der darin enthaltene Feuchtegehalt der Luft auskondensieren und bei weiterer Auskühlung zu Beschädigungen des Wärmeübertragers durch Vereisungen und zu einer eingeschränkten Leistungsfähigkeit führen. Die Frostschutzsteuerung besteht aus einem Thermostat, das die Lufttemperatur an der Fortluftseite des Lüftungsgeräts misst, und einer Steuereinheit, die den Zuluftventilator bei Ablufttemperaturen unter 5°C ausschaltet. Sobald die Fortlufttemperatur um 3K angestiegen ist, wird der Lüfter wieder in Betrieb genommen. Das Prinzip der Gefrierschutzregelung ist anhand der Temperaturverläufe eines kalten Wintervormittags in Abb. 26 dargestellt.

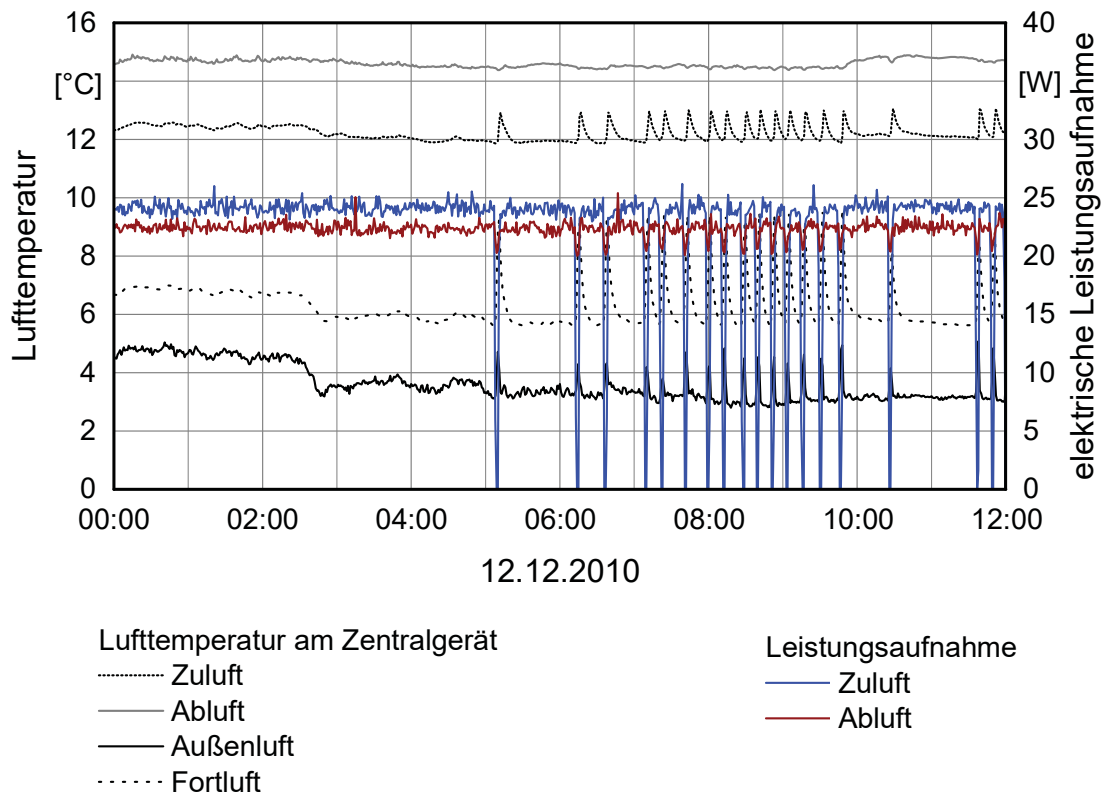


Abb. 26: Gemessene Lufttemperaturen am Zentralgerät und Leistungsaufnahme der beiden Ventilatoren, vgl. [Ziegler 2010]

In den frühen Morgenstunden des angegebenen Messzeitraums sinkt die Fortlufttemperatur auf etwa $5,5^{\circ}\text{C}$ ab, woraufhin der Zuluftventilator angehalten wird. Nach Ansteigen der Fortlufttemperatur um ca. 3°C wird der Lüfter wieder angeschaltet. Aus Abb. 26 ist zu entnehmen, dass bei sinkender Außenlufttemperatur die Intervalle zwischen Ein- und Ausschalten des Ventilators immer kürzer werden. Dies führt dazu, dass die benötigte Frischluft nicht gleichmäßig in das Gebäude einströmen kann. Durch die längeren Standzeiten in den außenwandintegrierten Luftkanälen kühlt die Luft im Zuluftstrang schneller ab, was zu niedrigeren Lufttemperaturen führen kann.

Nach [Paul 2002] gibt es verschiedene Möglichkeiten, ein Vereisen des Wärmeübertragers in Frostperioden zu verhindern. Die gängigste und einfachste Lösung, die sich auch mit geringem Aufwand für bereits installierte Lüftungsanlagen nachrüsten lässt, ist der Einbau einer Defrosterheizung. Die kalte Außenluft wird ab einer bestimmten Grenztemperatur über ein Heizregister vorgewärmt und sichert damit den einwandfreien Betrieb der Anlage. Die oben beschriebene Frostschutzregelung durch Abschalten des Zuluftventilators kommt zwar ohne zusätzlichen elektrischen Hilfsenergiebedarf aus, allerdings sind die Wärmeverluste aufgrund des Abtauvorgangs höher und die entstehenden Unterschiede der Zuluft- und Abluftmengen nachteilig. Mithilfe eines Zuluft-Bypasses kann ein Teil der kalten Außenluft am Wärmeübertrager vorbeigeleitet werden, damit die feuchte Abluft im Wärmetauscher nicht zu stark abkühlt. Dies kann jedoch zu unbehaglichen Zulufttemperaturen in den Räumen führen. Eine weitere Möglichkeit zur Vorwärmung der Außenluft kann über einen Erdreichwärmetauscher realisiert werden. Dazu wird die Luft im frostfreien Untergrund über erdverlegte Kanäle in das Gebäude

geleitet. Dies kann im Prinzip nur im Neubau umgesetzt werden, da der Einbau eines Erdwärmeübertragers bei Bestandssanierungen zu unverhältnismäßig hohen Kosten führt oder aufgrund der vorliegenden baulichen Gegebenheiten nicht möglich ist.

3.4.3 Wärmerückgewinnung

Moderne Lüftungszentralgeräte mit Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertragern erreichen in der Regel Wärmerückgewinnungsgrade von über 90 %. Für das im Demonstrationsgebäude installierte Lüftungssystem ist jedoch nicht nur die Effizienz des Lüftungsgeräts, sondern auch die Temperaturentwicklung der Zu- und Abluft und die damit verbundenen Wärmeverluste bei Durchströmung durch die fassadenintegrierte Luftkanalführung entscheidend. Am Demonstrationsgebäude werden nur Lufttemperaturen und keine Enthalpieströme erfasst, sodass für die Bestimmung der Effizienz der Lüftungsanlage nicht der Wärmerückgewinnungsgrad η als Beurteilungsgröße, sondern die außenluftbezogene Rückwärmezahl Φ verwendet wird. Die Rückwärmezahlen des Lüftungsgeräts [VDI 3803] und des Gesamtsystems [Ziegler et al. 2013] bestimmen sich nach den Formeln (3.1) und (3.2). Es werden nur diejenigen stündlichen Temperaturwerte verwendet, die das nachstehende Kriterium erfüllen. So werden nur Rückwärmezahlen erfasst, die im Bereich zwischen 0 und 1 liegen.

$$\Phi_{Gerät} = \frac{\theta_{Zu} - \theta_{Au}}{\theta_{Ab} - \theta_{Au}} \text{ mit } \theta_{Zu}, \theta_{Ab} > \theta_{Au} \quad (3.1)$$

$$\Phi_{System} = \frac{\bar{\theta}_{Zu,R} - \theta_{Au}}{\bar{\theta}_{Ab,R} - \theta_{Au}} \text{ mit } \theta_{Zu,R}, \theta_{Ab,R} > \theta_{Au} \quad (3.2)$$

Für die Berechnung der System-Rückwärmezahl werden nicht die Lufttemperaturen am Zentralgerät, sondern die mittlere Lufttemperatur am Austritt der Ablufträume und die mittlere Lufttemperatur am Eintritt in die Zulufräume verwendet. Diese Kenngröße charakterisiert die Wärmerückgewinnung des gesamten Lüftungssystems inklusive der fassadenintegrierten Luftkanalführung und wird in Prozent angegeben. Die berechneten Rückwärmezahlen werden jeweils in 0,5 K-Schritten in Temperaturklassen sortiert. Die sortierten Werte können anschließend mithilfe einer Pivot-Tabelle gemittelt werden. In Abb. 27 sind die berechneten Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für die erste Heizperiode von September 2010 bis Ende April 2011 dargestellt. Die außenluftbezogene Rückwärmezahl des Lüftungsgeräts liegt bei tiefen Außenlufttemperaturen bei über 90 % und sinkt bei steigender Außenlufttemperatur auf Werte um etwa 80 %. Die Rückwärmezahl des gesamten Lüftungssystems inklusive der Kanalführung in der Fassadenebene liegt bei sehr kalten Außentemperaturen bei über 60 % und sinkt mit steigender Außenlufttemperatur. Bei Außentemperaturen von 10°C weist das System noch eine Effizienz von 50 % auf.

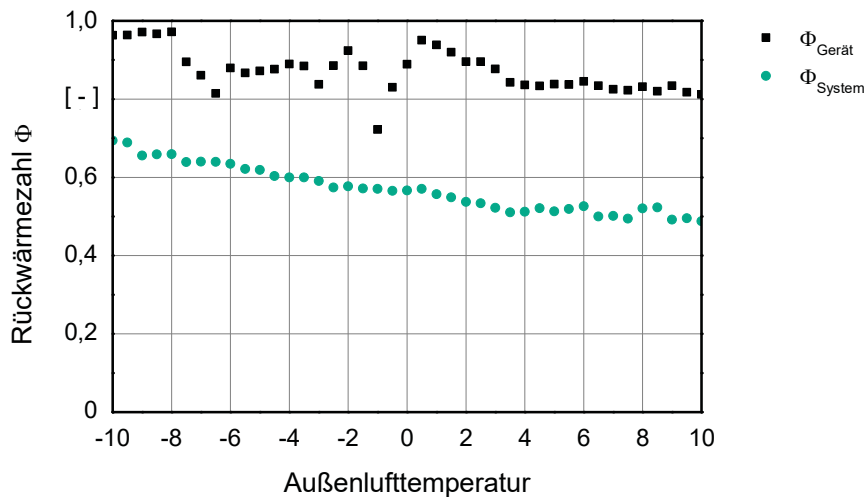


Abb. 27: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für die Heizperiode 2010/2011

Die Rückwärmezahlen werden für den gesamten Beurteilungszeitraum ebenfalls berechnet und die klassierten Temperaturwerte in einer Pivot-Tabelle gemittelt. In Abb. 28 sind die Rückwärmezahlen für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem während der drei untersuchten Heizperioden dargestellt. Hier zeigt sich ein ähnlicher Verlauf, sodass sich sowohl für das Lüftungszentralgerät als auch für das gesamte System bei tieferen Außenlufttemperaturen höhere Rückwärmezahlen ergeben. Über die anliegende Außentemperatur gewichtet ergibt sich im Mittel eine Rückwärmezahl des Gesamtsystems von 60 %. Die gemessenen Rückwärmezahlen für die Heizperioden 2011/2012 und 2012/2013 sind im Anhang in Abb. A 5 und Abb. A 6 aufgeführt und zeigen vergleichbare Werte.

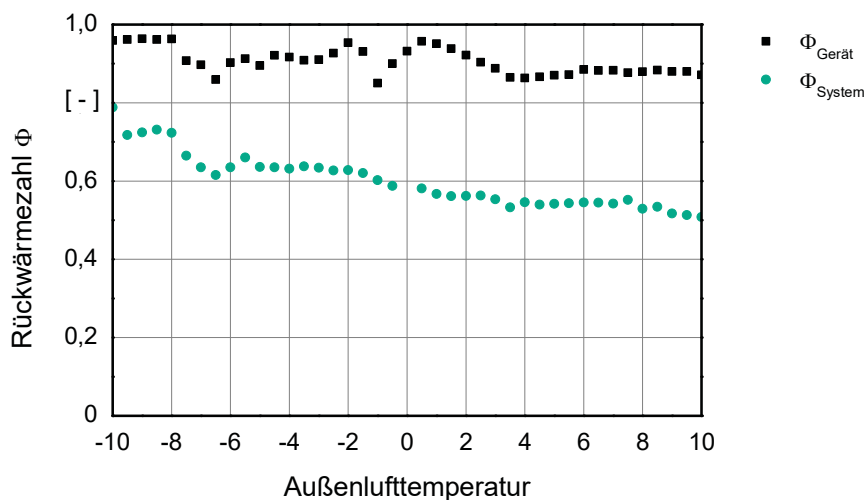


Abb. 28: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für drei untersuchte Heizperioden

3.4.4 Wärmestromdichte im Außenwandquerschnitt

Die fassadenintegrierte Luftführung im Wärmedämmverbund-System stellt eine Störung des Temperaturfeldes der Außenwand dar und kann in Abhängigkeit der Kanallufttemperatur zu erhöhten oder geminderten Wärmeverlusten und somit zu einer Änderung des thermischen Widerstands der Außenwand führen. Am Demonstrationsgebäude in Kassel werden die Wärmestromdichte der ungestörten Außenwand und die Wärmestromdichte im Bereich eines Zuluftkanals auf Höhe des Arbeitszimmers messtechnisch erfasst. Außerdem befinden sich vor und hinter der Wärmedämmschicht im Bauteilquerschnitt Temperatursensoren, um das jeweilige Temperaturprofil bestimmen zu können. Weitere Temperaturmessfühler sind an der äußeren Kanaloberfläche und mittig im Luftkanal angeordnet. Eine Darstellung der Außenwandquerschnitte und der verbauten Messsensoren ist in Abb. 29 zu sehen.

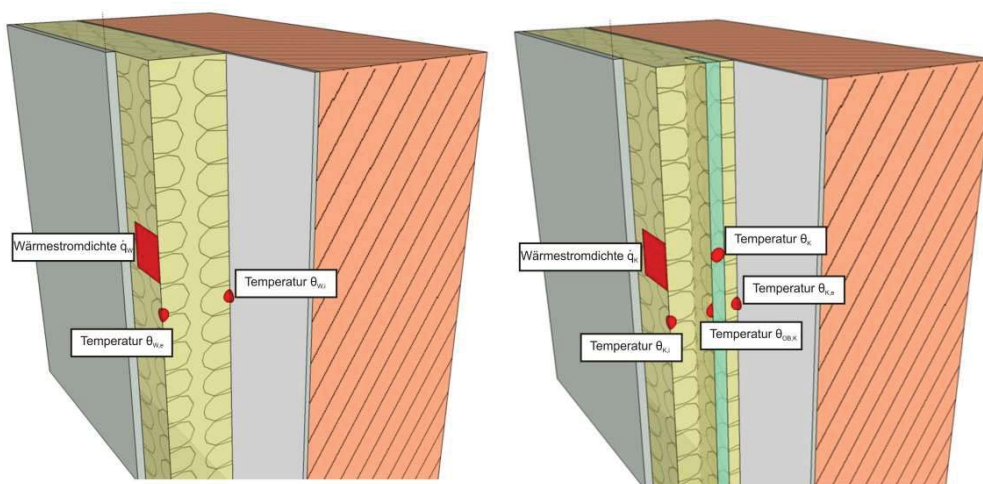


Abb. 29: Querschnitt der Außenwand mit Wärmestromdichte- und Temperaturmessung im Regelquerschnitt (links) und auf Höhe eines vertikalen Luftkanals (rechts)

Der zusätzliche Wärmeverlust, der durch die Anordnung der Luftkanäle auf der Fassade herbeigeführt wird, kann ähnlich wie bei Wärmebrücken mit dem Wärmebrückenverlustkoeffizienten ψ beschrieben werden. Die Temperaturdifferenz an der homogenen Bauteilschicht der Wärmedämmung führt zu einem Wärmestrom. Die Wärmestromdichte berechnet sich dann nach [Häupl et al. 2013] zu:

$$\dot{q}_W = \frac{1}{R_W} \cdot (\theta_{W,i} - \theta_{W,e}) \quad (3.3)$$

Die Wärmestromdichte am Wand- und Kanalprofil der Außenwand wird in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz für die verschiedenen Lüfterstufen aufgetragen und in 0,5 K Temperaturklassen sortiert. Die klassierten Werte der Wärmestromdichte werden mit einer Pivot-Tabelle gemittelt. In Abb. 30 ist die Wärmestromdichte an der homogenen Wärmedämmschicht am Wandprofil und auf Höhe des Zuluftkanals in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Wärmestromdichte am Kanalprofil stets größer als die am ungestörten Wandquerschnitt ist. Die Wärmestromdichte steigt jeweils linear mit der anliegenden Temperaturdifferenz und die Steigung der Funktion beschreibt den thermischen Widerstand am Wand- bzw. Kanalprofil. Über eine lineare Regression kann dieser ermittelt

werden. Die Differenz der beiden Quotienten ergibt schließlich den Wärmebrückenverlustkoeffizienten ψ , der sich durch den fassadenintegrierten Luftkanal einstellt.

$$\Psi = \frac{\dot{\Delta}q_K}{\Delta\theta_K} \cdot l - \frac{\dot{\Delta}q_W}{\Delta\theta_W} \cdot l \quad (3.4)$$

Die in Abb. 30 dargestellten Verläufe der Wärmestromdichte gelten für einen Gesamt-Zuluftvolumenstrom von 227 m³/h und entsprechen der Lüftungsstufe Intensivlüftung. Die Differenz der Steigungen beider Geraden führt auf einen Wärmebrückenverlustkoeffizienten von 0,05 W/(mK). Die gemessenen Wärmestromdichten für weitere Lüftungsstufen und die daraus resultierenden Ψ -Werte sind im Anhang in Abb. A 7 zu finden.

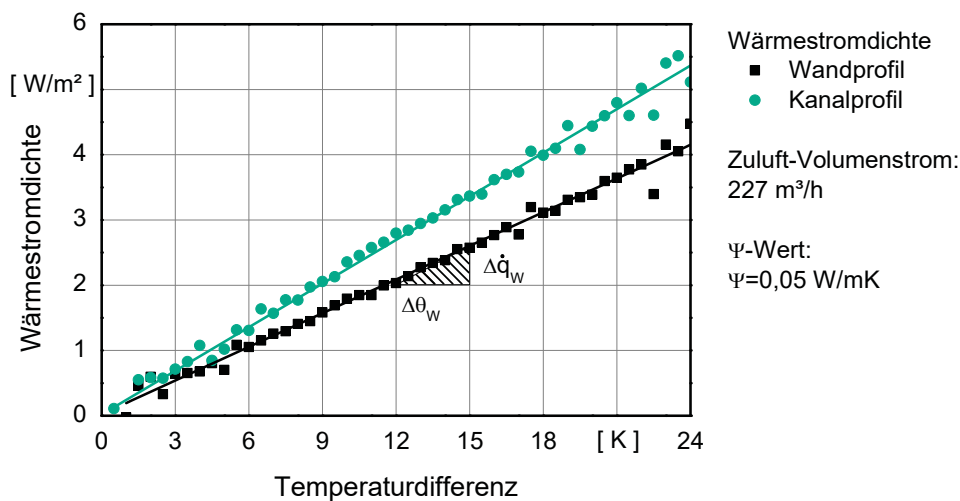


Abb. 30: Wärmestromdichte an der homogenen Wärmedämmschicht am Wandprofil und auf Höhe des Zuluftkanals in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz

Der Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ hängt stark von der Lüftungsstufe respektive dem geförderten Volumenstrom ab. Mit steigendem Volumenstrom in den fassadenintegrierten Luftkanälen steigt der konvektive Wärmeübergang an der Luftkanaloberfläche und somit auch der Wärmestrom nach außen an. In Abb. 31 ist der Wärmebrückenverlustkoeffizient in Abhängigkeit des gesamten Zuluftvolumenstroms am Lüftungszentralgerät für verschiedene Lüftungsstufen aufgetragen. Unter der Voraussetzung, dass sich der Volumenstrom, der den Fassadenkanal im Bereich der Wärmestrommessung durchströmt, im gleichen Verhältnis verändert wie die eingestellte Gesamtzulufte, ergeben sich die resultierenden Wärmeverlustkoeffizienten, die in erster Näherung linear mit dem Volumenstrom ansteigen. Der Wärmeverlustkoeffizient für Lüftung zum Feuchteschutz führt zu einem Wert von 0,01 W/(mK) und steigt im Falle der reduzierten Lüftung auf etwa 0,03 W/(mK) an. Für die Auslegungsstufe Nennlüftung beträgt der Ψ -Wert 0,04 W/(mK) und für Intensivlüftung etwa 0,05 W/(mK).

Bei Intensivlüftung und einem Volumenstrom von etwa 220 m³/h zeigt sich ein deutlich geringerer Wärmebrückenverlustkoeffizient als der prognostizierte Wert, der über die Näherungsgerade hervorgehen würde. Dies ist mit der Frostschutzregelung zu erklären, die zu einem Abschalten des Zuluftventilators bei Außenlufttemperaturen unterhalb von 5°C führt. Durch den geringeren Volumenstrom im Lüftungskanal sinken die gemessene Wärmestromdichte und der daraus

berechnete Ψ -Wert. Dies ist auch anhand der flacheren Steigung der Regressionsgerade in Abb. A 7 im Anhang zu erkennen.

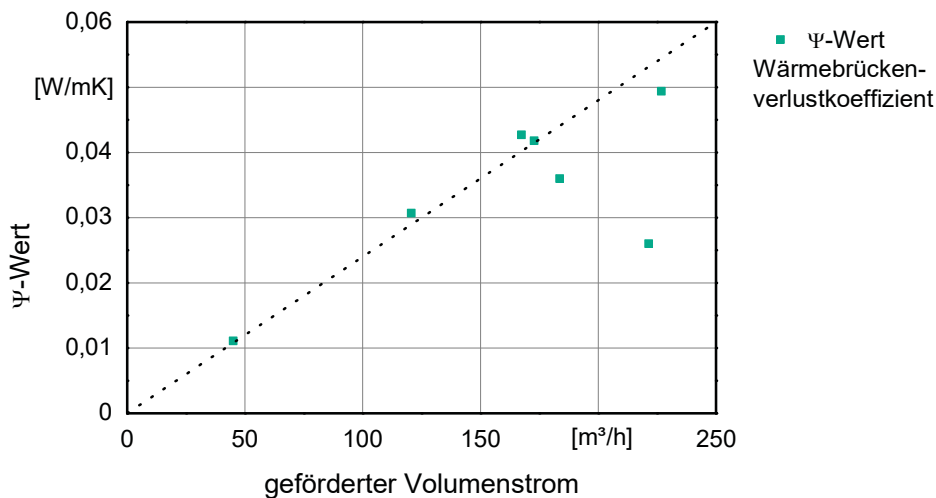


Abb. 31: Wärmebrückenverlustkoeffizient in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms für verschiedene Lüftungsstufen

3.4.5 Relative Luftfeuchte

Die in das Kanalnetz strömende Raumluft kühlt auf dem Weg in Richtung des Lüftungszentralgeräts in den fassadenintegrierten Luftkanälen ab und kann dadurch weniger Wasserdampf aufnehmen als die wärmere Raumluft. Sobald die Wasserdampfkonzentration in der Luft den Sättigungszustand erreicht hat, bildet sich Tauwasser, das an der Luftkanaloberfläche ausfallen kann. Um die Gefahr der Tauwasserentwicklung in den Luftkanälen beurteilen zu können, wird an ausgewählten Messstellen im Zuluft- und Abluftkanalnetz die relative Luftfeuchte mithilfe des Monitoringsystems erfasst. In diesem Kapitel wird die relative Luftfeuchte, also das Verhältnis aus vorhandener Wasserdampfkonzentration zur maximal löslichen Wasserdampfmenge, ausgewertet.

Dazu werden Zeiträume während der drei Heizperioden ausgewählt, in denen beide Geschosse gleichmäßig beheizt sind und der störungsfreie Betrieb der Lüftungsanlage nicht durch die Frostschutzregelung beeinträchtigt ist. Entsprechende Zeiträume über die Beheizung der Wohnungen und die Funktion der Lüftungsanlage können Abb. A 3 im Anhang entnommen werden. Die gemessenen Ablufttemperaturen in den Küchen der jeweiligen Wohnungen geben Aufschluss über die Beheizung und die Leistungsaufnahmen der Ventilatoren über die eingestellte Lüftungsstufe. Es werden nur Zeitabschnitte mit tiefen Außenlufttemperaturen verwendet. In Abb. 32 sind die gemessenen Feuchteverläufe im Fußpunkt des Abluftkanalstrangs der Bäder, am Eintritt in das Wohnzimmer im Obergeschoss (OG) und die gemessene Außenlufttemperatur für zwei repräsentative Wochen während der Heizperioden aufgetragen. Die Zeitschrittweite beträgt jeweils zehn Minuten.

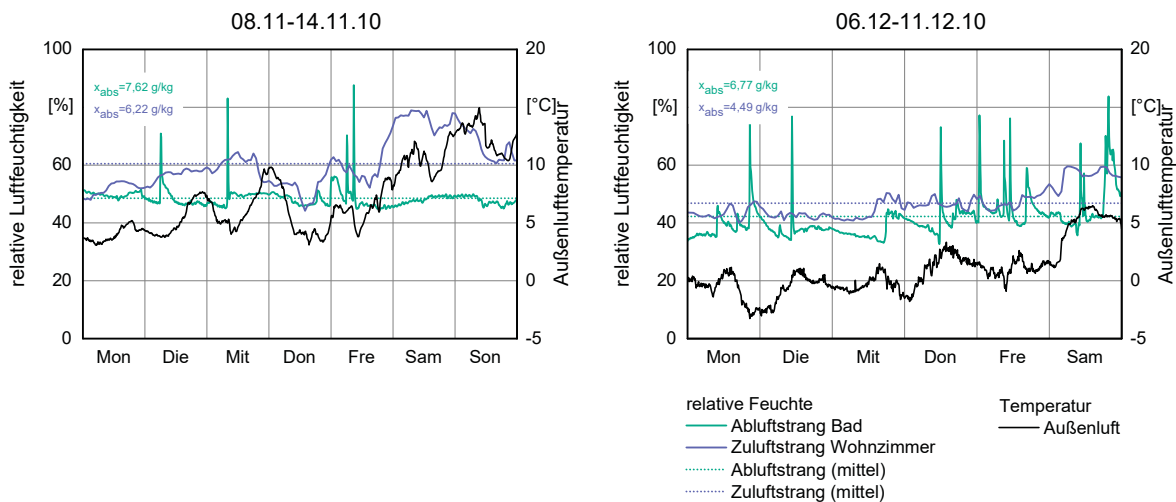


Abb. 32: Gemessene relative Luftfeuchte im Fußpunkt des Bad-Abluftkanals und im Zuluftkanal vor Eintritt der Luft in das obere Wohnzimmer sowie gemessene Außenlufttemperatur für zwei ausgewählte Zeiträume während der Heizperiode

Für den Zeitraum 08.11.2010-14.11.2010 beträgt die relative Luftfeuchte im Zuluftkanal im Mittel ca. 60 %. Der zeitliche Verlauf deckt sich in etwa mit der Änderung der Außenlufttemperatur im untersuchten Zeitabschnitt. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Abluftkanalstrang liegt bei etwa 55 %. An einigen wenigen Zeitpunkten steigt die relative Luftfeuchtigkeit aufgrund von Feuchtelasten auf 80-85 % an, sinkt aber durch den konstanten Abluftstrom rasch wieder ab. Der Messzeitraum 06.12.2010-11.12.2010 zeigt einen ähnlichen Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Außenlufttemperatur ist mit Werten zwischen -3°C und 5°C deutlich geringer. Dadurch ist die gemessene relative Luftfeuchte im Zuluftkanal ebenfalls niedriger. Die mittlere relative Feuchte in beiden Luftkanalsträngen beträgt weniger als 50 %. Weitere Feuchteverläufe sind im Anhang in Abb. A 8 dargestellt.

Durch die oben aufgeführte Analyse der gemessenen relativen Luftfeuchte für die ausgewählten Zeiträume während der Heizperiode kann ein Tauwasserausfall im Luftkanalnetz ausgeschlossen werden. Selbst kurzzeitige Feuchtelastspitzen in den Bädern führen nur vorübergehend zu erhöhten relativen Feuchten, die innerhalb kurzer Zeit durch den konstanten Abluftvolumenstrom während des Lüftungsbetriebs sicher abgeführt werden.

3.4.6 Erstinspektion und Reinigung

Um den Zustand der fassadenintegrierten Luftkanalführung des Lüftungssystems nach vier Betriebsjahren auf sichtbare Verschmutzungen, mechanische Beschädigungen und erkennbare Leckagen überprüfen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Erstinspektion durchgeführt. Dazu wird ein Videoinspektionssystem der Fa. Wöhler¹⁵ eingesetzt. Die Videoinspektionskamera besteht aus einem Farbkamerakopf, der über eine 20 m lange Schubstange mit einem Farbmonitor verbunden ist und in Echtzeit mit bewegten Bildern die Beschaffenheit der inneren

¹⁵ Wöhler VIS 250 Videoinspektionskamera siehe auch:
<http://www.woehler.de/shop/de/produkte/inspektionstechnik/videoinspektion>

Oberfläche des Kanals dokumentiert. Um den genauen Standort im Kanal feststellen zu können, wird die Lage des Kamerakopfes mithilfe einer Meterzählung am Bildschirm dargestellt.

Zunächst werden das Lüftungszentralgerät und die daran angeschlossenen Wickelfalzrohre im Keller inspiziert. Hierzu müssen am Lüftungsgerät die Wartungsöffnungen entfernt und die Filtermatten auf der Außen- und Abluftseite entnommen werden, damit der Kamerakopf in die Luftleitungen eingesetzt werden kann. Der zentrale Zuluftkanal ist aufgrund des großen Rohrschalldämpfers nicht zugänglich. Der Fortluftkanal nach dem Wärmeübertrager ist für die Inspektion nicht relevant, da die Fortluft bereits abluftseitig gefiltert wird und keine Verschmutzungen zu erwarten sind. Die Außenluftansaugung und der Fortluftaustritt sind von außen einsehbar. In Abb. 33 ist der Außenlufteinlass mit dem Lüftungsgitter zu sehen. Grober Schmutz sammelt sich am Gitter und kann somit nicht in die Luftkanäle gelangen. Der zentrale Abluftkanal zwischen der fassadenintegrierten horizontalen Sammelleitung und dem Lüftungszentralgerät weist im geraden Kanalabschnitt keine Verschmutzungen oder Beschädigungen auf. Lediglich im Bereich einer 90°-Umlenkung sind Staubablagerungen festzustellen, wie aus Abb. 34 zu entnehmen ist.



Abb. 33: Außenluftansaugung mit Lüftungsgitter



Abb. 34: 90°-Umlenkung im zentralen Abluftkanal mit Staubablagerungen

Die Inspektion der vertikalen dämmstoffintegrierten Luftkanäle wird über die Tellerventile am Ein- und Auslass der einzelnen Räume vorgenommen. Die Tellerventile werden dazu vorübergehend entfernt, damit der Kamerakopf in den Kanal eingeführt werden kann. Je ein Zuluft- und Abluftventil sind im Anhang in Abb. A 9 und Abb. A 10 dargestellt. An den abmontierten Tellerventilen sind teilweise leichte Staubansammlungen zu sehen. Nach Abmontieren der Ventile sind die horizontalen Verbindungsleitungen zwischen Raum und vertikalem Lüftungskanal einsehbar. In Abb. 35 und Abb. 36 sind die Verbindungsstücke zwischen dem Wohnzimmer im Obergeschoss und dem vertikalen fassadenintegrierten Lüftungskanal sowie dem Bad im Obergeschoss und der Fassadenkanalführung abgebildet. Im Bereich der horizontalen Leitungen sind auf den Bildern Staubablagerungen zu erkennen, die am Badauslass jedoch deutlich ausgeprägter sind. Insbesondere an den Abluftleitungen sind Spinnweben zu sehen, die jedoch vom Innenraum aus gereinigt werden können.



Abb. 35: Verbindungsstück zwischen Wohnzimmer im OG und Fassadenkanal



Abb. 36: Verbindungsstück zwischen Bad im OG und Fassadenkanal

Nach Einführen des Kamerakopfes in die vertikalen Leitungen kann der Zustand der dämmstoffintegrierten Kanalführung überprüft werden. Die untenstehenden Aufnahmen der Inspektionskamera in Abb. 37 und Abb. 38 stellen den Zuluftkanal im Bereich des oberen Wohnzimmers und eines Abluftkanals im Küchenabluftstrang auf Höhe der oberen Wohnung dar. Die Bilder zeigen repräsentativ die Beschaffenheit der fassadenintegrierten Luftkanäle im Zuluft- bzw. Abluftstrang. In den untersuchten Zuluftkanälen sind keine Verschmutzungen oder Staubanlagerungen zu erkennen. Alle Verunreinigungen und Schwebstoffe aus der angesaugten Außenluft werden wirkungsvoll vor Eintritt der Außenluft in den Wärmeübertrager des Zentralgeräts gefiltert. In den Abluftkanälen auf der Fassade sind viele Spinnweben mit Staublegerungen zu sehen, die jedoch mit der Kanallänge abnehmen. Um die Kanäle vor Verunreinigungen zu schützen, empfiehlt sich der Einsatz von Abluftfiltern, die direkt an die Tellerventile in Küche und Bad angebracht werden.

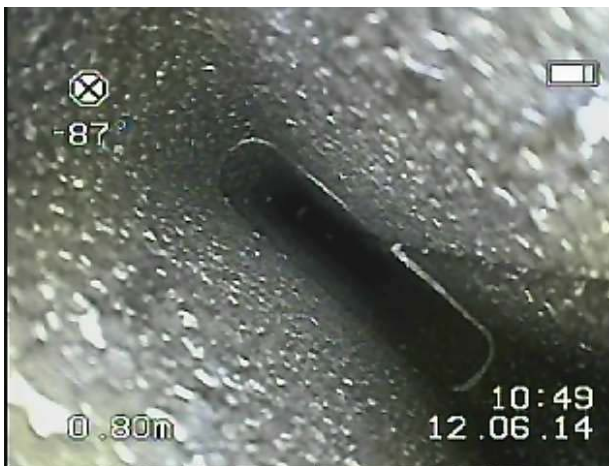


Abb. 37: Vertikaler Lüftungskanal im oberen Wohnzimmer



Abb. 38: Vertikaler Lüftungskanal in der oberen Küche

3.5 Zusammenfassende Bewertung

Die in diesem Kapitel durchgeführte messtechnische Analyse und Auswertung der Langzeitmessungen am Demonstrationsgebäude in Kassel liefern wichtige Erkenntnisse über die Funktionsweise und das Betriebsverhalten des dort umgesetzten Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung. Die dort ermittelten Kennwerte und Einflussgrößen auf das Gesamtsystem werden nachfolgend zusammengefasst und wirkungsvolle Verbesserungsmöglichkeiten für die Betriebsführung des Systems aufgezeigt.

Aus der Inbetriebnahme und den Betriebserfahrungen der ersten Jahre am Demonstrationsgebäude zeigt sich, dass eine raumweise Regelung der Luftvolumenströme mit der fassadenintegrierten Leitungsführung und eine ausgeglichene Luftbilanz möglich ist. Die Systemdruckverluste für den Zuluft- und Abluftstrang führen jedoch aufgrund der unterschiedlichen Kanallängen und vermuteten Leckagen im Bereich der horizontalen Sammelleitung zu deutlich abweichenden Werten. Aus diesem Grund liegt der Leistungsbedarf des Abluftventilators nach getrennter Ansteuerung auch um den Faktor 2 über dem Wert des Zuluftventilators. Für weitere praktische Anwendungen des Systems sollte daher die Luftkanalführung und die hydraulische Auslegung des Luftkanalnetzes gründlicher dimensioniert werden. Dafür müssen allerdings die hydraulischen Kennwerte für die dämmstoffintegrierten Kanäle wie der spezifische Druckverlust, der Rauigkeitswert des Materials und die Druckverlustbeiwerte für Anschlussdetails bekannt sein. Diese Wissenslücke soll methodisch durch experimentelle Untersuchungen und die hydraulische Bewertung der Dämmstoffkanalplatten im nächsten Kapitel geschlossen werden.

Bei tiefen Außentemperaturen führt die Frostschutzregelung am Zentralgerät des Testgebäudes durch ständiges Takten des Zuluftventilators zu einer mangelhaften Versorgung mit Frischluft. Durch die Installation einer Defrosterheizung könnte diese Problematik behoben werden, da der Lüfter aufgrund der verbesserten Zuluftbedingungen konstant betrieben werden könnte. Der benötigte jährliche Hilfsstrombedarf der Lüftungsanlage würde aufgrund des Heizregisters jedoch geringfügig ansteigen. Die messtechnische Analyse hat zudem gezeigt, dass eine Tauwasserbildung in den Kanälen ausgeschlossen werden kann, da der kontinuierliche Volumenstrom während des Betriebes der Lüftungsanlage Feuchtelasten sicher abführt.

Die nach vier Betriebsjahren durchgeführte Inspektion der lüftungstechnischen Komponenten des Systems erfolgt visuell über ein professionelles Videoinspektionssystem. Die Überprüfung soll Verschmutzungen innerhalb der Lüftungsleitungen und mögliche Beeinträchtigungen für eine einwandfreie Funktionsweise belegen. Hierbei ist festzustellen, dass lediglich im Abluftbereich innerhalb der luftführenden Leitungen Staub und andere Ablagerungen aufzufinden sind. Durch das Anbringen von Filtern an den Tellerventilen können Verschmutzungen und das Eindringen von Fremdstoffen in die Kanäle unterbunden werden. Der Gesamtdruckverlust im jeweiligen Strang würde sich dabei etwas erhöhen.

Mithilfe der Auswertung der Langzeitmessungen, deren Ergebnisse in diesem Kapitel dargestellt sind, können Kennwerte über das energetische Verhalten der fassadengeführten Luftkanalführung abgeleitet werden. So beträgt die Rückwärmezahl für das Lüftungssystem unter Berücksichtigung der dämmstoffintegrierten Luftleitungen über die gesamte Heizperiode im Mittel etwa 60 %. Auch der zusätzliche Wärmeverlust, der sich durch die Anordnung der Luftleitungen

innerhalb der Dämmschicht in der Außenwand ergibt, kann dadurch ermittelt werden. Die Wärmebrückenverlustkoeffizienten betragen je nach Höhe des geförderten Luftvolumenstroms zwischen 0,01 W/mK und 0,05 W/mK. Der Einfluss der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle auf den Gesamttransmissionswärmeverlust des Gebäudes wird in der energetischen Bewertung in Kapitel 7.2.2 dargestellt.

Für eine Weiterentwicklung und die Identifizierung von Systemoptimierungen sind die Kennwerte der Messdatenanalyse allerdings nicht ausreichend. Die komplexen wärmetechnischen Vorgänge und die Auswirkungen auf das Gesamtverhalten des Sanierungssystems können methodisch durch eine gesamtenergetische Bilanzierung über ein thermisch-hydraulisch gekoppeltes Modell bewertet werden. Für die spätere Überprüfung des Simulationsmodells werden die realen Messdaten und Ergebnisse der Voruntersuchungen aus diesem Abschnitt der Arbeit verwendet.

4 Hydraulische Bewertung der dämmstoffintegrierten Luftkanäle im Strömungslabor

4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der energieeffiziente Betrieb einer zentralen Lüftungsanlage hängt maßgeblich von der hydraulischen Auslegung des Luftkanalnetzes und den damit verbundenen Druckverlusten im Zuluft- und Abluftkanalsystem ab. Der Druckverlust wird bei vorgegebenem Durchfluss durch die Kanalgeometrie, die Oberflächenbeschaffenheit, die Kanallängen, die Umlenkungen und die Anschlussstücke beeinflusst.

Aus der in Kapitel 3 dargestellten messtechnischen Analyse am Testgebäude ist hervorgegangen, dass das strömungstechnische Verhalten der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und die hydraulischen Eigenschaften der Kanaloberflächen bislang weitestgehend unbekannt sind. Außerdem konnten die möglichen Undichtigkeiten am realisierten Lüftungssystem am Gebäude in Kassel nicht exakt quantifiziert und erklärt werden. In diesem Kapitel wird eine Methode vorgestellt, wie die Druckverluste der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle sowie die Eigenschaften der Kanaloberfläche bestimmt werden können. Dabei werden neben den geraden Kanalplatten auch Anschlussstücke, wie eine 90°-Umlenkung, und eine Durchführung des dämmstoffintegrierten Kanals zum Raum messtechnisch untersucht und bewertet.

Die einzelnen Kanalplatten werden über ein Nut-und-Feder-System miteinander verbunden und bilden im eingebauten Zustand den Kanal. Undichtigkeiten im Bereich der Stoßfugen können zu Leckagen und zusätzlichen Druckverlusten führen. Mithilfe der gewählten Messmethode wird in diesem Abschnitt der Leckagevolumenstrom dahingehend analysiert, ob ein verlegungstechnisch einfaches Aneinanderlegen ausreichend ist oder weitere Abdichtungsmaßnahmen zwischen den Dämmpaneelen vorgesehen werden müssen. Durch die hydraulischen Bewertungen der Dämmkanalplatten ist es zukünftig möglich, die Leitungsführung auf der Fassade auch für weitere Gebäude zu planen und die dafür nötige Lüftungsanlage zu dimensionieren.

Zunächst werden das Messverfahren und die dafür relevanten Messeinrichtungen beschrieben sowie auf die theoretischen Grundlagen zur Druckverlustbestimmung und der messtechnischen Erfassung der Leckagerate zwischen den Dämmkanalplatten eingegangen. In einem nächsten Schritt werden die Messergebnisse der hydraulischen Untersuchungen dargestellt und für die Kanalplatten und untersuchten Anschlussstücke erstmalig hydraulische Kennwerte gebildet. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und eine Bewertung vorgenommen.

4.2 Messverfahren und Aufbau

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Druckverlustmessungen fanden im Strömungslabor des Fachgebiets Bauphysik der Universität Kassel statt. Das Messsystem besteht aus einem Radialventilator, zwei Laminarstromelementen (Laminar Flow Element: LFE)¹⁶, einem Differenzdruckmessgerät, einem Datenlogger und einem PC zur Speicherung der Messdaten.

4.2.1 Messung des Luftvolumenstroms

Der Luftvolumenstrom wird über das Wirkdruckverfahren mit Laminarstromelementen gemessen. In einem geschlossenen Kanalsystem kann der Durchfluss über einen Druckabfall des strömenden Mediums bestimmt werden [SI 2007]. LFE-Messungen bieten gegenüber der Messung mit Blenden und Drosseln den Vorteil, dass der Einbau des Messgeräts lediglich zu einem sehr geringen Druckabfall führt, der auf die Messung nahezu keinen Einfluss hat. Das LFE besteht aus einem Kapillarröhrchenpaket (siehe Abb. 39), an dessen Ein- und Auslass der Druckunterschied gemessen wird. Ist die Strömung innerhalb des Laminarstromelementes laminar, so besteht nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchsatzvolumen und der Druckdifferenz. Der am LFE anliegende Druckabfall kann dann über das Differenzdruckgerät ausgewertet und über eine Kalibrierfunktion in den entsprechenden Volumenstrom überführt werden. Die Regelung des Ventilators am Beginn der Messstrecke erfolgt über den gemessenen Volumenstrom am LFE. Der Volumenstrom wird stufenweise alle 30 s um 5 m³/h erhöht. Werden innerhalb des Messintervalls nicht genügend Werte erfasst, so wird weiter bei gleichem Volumenstrom gemessen, bis ausreichend Werte zur Verfügung stehen. Der Lüfter ist über eine Beruhigungsstrecke mit dem LFE verbunden, um eine laminare Einströmung am LFE zu gewährleisten. Ein geordnetes Geschwindigkeitsprofil vor Eintritt der Luft kann erreicht werden, wenn ausreichend lange Ein- und Ausströmlängen eingehalten werden. Nach [Fitzner 2013a, 2013b] sind in real verbauten raumluftechnischen Anlagen häufig keine ausreichend langen geradlinigen Kanalabschnitte vorhanden, die für regelmäßige Strömungsprofile bei der Luftgeschwindigkeitsmessung notwendig sind.

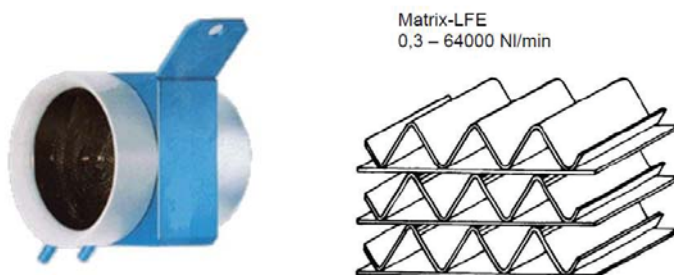


Abb. 39: Laminarstromelement (Grafik: LFE-Typ PT Größe 5 [SI 2007]) links und prinzipieller Aufbau der Kapillarröhrchenstruktur im Inneren des LFE (Grafik: [Ilg 2013]) rechts

¹⁶ SI Special Instruments: LFE-Typ PT Größe 4 www.specialinstruments.com

4.2.2 Messung der Druckdifferenz

Grundlage für die Druckmessung in einem strömenden Medium stellt die Gleichung nach Bernoulli dar [Meinert et al. 2013]. Der Gesamtdruck setzt sich aus dem statischen Druck, dem geodätischen Druck (Lagedruck) und dem dynamischen Druck zusammen. Bei verlustfreier Strömung ist der Gesamtdruck an zwei unterschiedlichen Stellen konstant.

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 = \text{const.} \quad (4.1)$$

Durch Erweiterung um einen Verlustterm erhält man:

$$(p_1 - p_2) + \rho g (z_1 - z_2) + \frac{\rho}{2} (w_1^2 - w_2^2) + \Delta p_v = 0 \quad (4.2)$$

Wird der Druck an einem waagerechten Kanalstück gemessen, so verschwindet der geodätische Druckanteil aufgrund der konstanten Höhe z . In einem kreisrunden oder rechteckigen Kanalquerschnitt bildet sich je nach Art der Strömung ein bestimmtes Strömungsprofil aus, das mithilfe der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung nach [Böswirth und Bschorer 2012] bestimmt werden kann. An der Rohrwandung des Kanals ist die Luftgeschwindigkeit gleich null, sodass der dynamische Druckanteil ebenfalls null ergibt. Wird die Druckdifferenz direkt an der Kanalwandung eines waagerechten Kanalstücks gemessen, so erhält man die statische Druckdifferenz.

Gerade Luftleitungen:

Die Druckerhöhung, die für die Messung des Druckverlusts der geraden Kanaldämmplatten benötigt wird, liefert am Teststand ein Radialventilator, der an eine Kanalstrecke aus runden Blechkanälen angeschlossen ist. Ein speziell hergestelltes Anschlussstück verbindet den runden Kanal mit dem ovalen, dämmstoffintegrierten Lüftungskanal. Die Abdichtung zwischen Dämmstoff und Anschlussstück wird mit Klebeband sichergestellt. Die Messstrecke beträgt insgesamt 6 m und wird aus zwölf zusammengelegten Dämmplatten hergestellt (siehe Abb. A 11 im Anhang). Am Beginn und Ende der Strecke wird der Doppelkanal, der von einem 2 cm breiten Steg getrennt ist, jeweils mittig angebohrt und mit einem Druckaufnehmer versehen. Die gemessene Druckdifferenz wird dann für jeden Volumenstrom am Differenzdruckgerät analysiert und aufgezeichnet. Der Messaufbau für die Druckverlustbestimmung der dämmstoffintegrierten Luftkanäle ist in Abb. 40 und Abb. 41 dargestellt.



Abb. 40: Messaufbau mit Ventilator, Beruhigungsstrecke und LFE



Abb. 41: Anschlussstück mit Druckaufnahme in den Kanälen

Anschlussstücke und Umlenkungen:

Die Messung des Druckverlusts der Einzelwiderstände erfolgt analog der Messung der geraden Luftleitungsabschnitte. Der Ventilator wird auch hier über das LFE angesteuert und die statische Druckdifferenz wird vor und nach dem Messobjekt bestimmt. Bei den untersuchten Einzelwiderständen handelt es sich um ein Kniestück (90°-Umlenkung) und ein Wandanschlussstück zur Verbindung des dämmstoffintegrierten Lüftungskanals mit dem Innenraum.

In Abb. 42 und Abb. 43 sind die beiden vermessenen Anschlussstücke zu sehen. Nicht symmetrische Kanaleinbauten, wie das Wandanschlussstück, können bei Durchströmung mit Über- und Unterdruck zu unterschiedlich hohen Druckverlusten führen, sodass die daraus resultierenden Druckverlustkennwerte nur für jeweils eine Durchströmungsrichtung gültig sind. Für den Wandanschluss bedeutet dies konkret, dass der Einbau der Umlenkung im Zuluftkanalnetz zu anderen hydraulischen Kennwerten führt als der Einsatz im Abluftkanalnetz. Zur Bewertung der strömungstechnischen Eigenschaften der Kanaleinbauten kann der Druckverlust in einen Widerstandsbeiwert umgerechnet und mit anderen Umlenkungen verglichen werden.

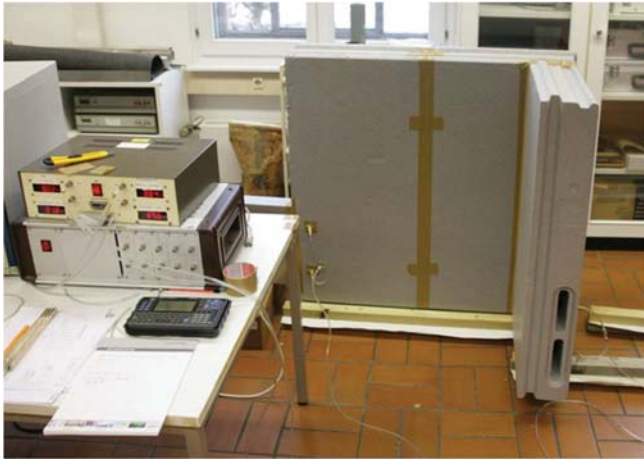


Abb. 42: 90°-Umlenkung

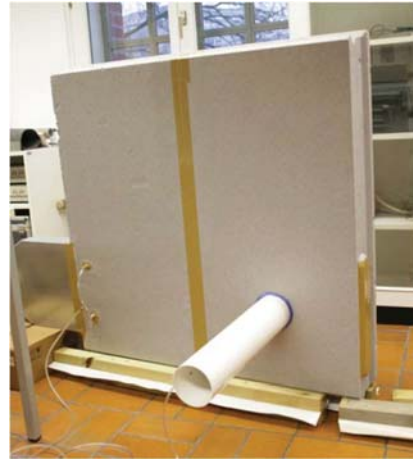


Abb. 43: Wandanschlussstück

Der Druckverlust von Einbauten im Kanalleitungsnetz wie Umlenkungen, Bögen und Querschnittsänderungen kann gemäß Formel (2.9) berechnet werden. Zur Charakterisierung der Einzelwiderstände wird der dimensionslose Widerstandsbeiwert verwendet, der sich nach [Recknagel und Sprenger 2011] aus dem Anteil für Wandreibung und dem zusätzlichen Umlenkungsbeiwert entsprechend nachfolgender Gleichung (4.3) zusammensetzt.

$$\zeta = \zeta_r + \zeta_u \quad (4.3)$$

Der resultierende Druckverlust für die gesamte Umlenkung beträgt dann

$$\Delta p = (\zeta_r + \zeta_u) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (4.4)$$

und der Anteil, der nur auf die Umlenkung zurückzuführen ist, ergibt sich zu:

$$\Delta p = \zeta_u \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (4.5)$$

Die gemessenen Druckverluste der Anschlussstücke können über die obengenannten Formeln in einen Widerstandsbeiwert überführt und mit Tabellenwerten aus der Literatur [Wagner 2012] verglichen werden.

4.2.3 Messung der Undichtigkeit

Zur Messung des Leckagevolumenstroms der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle werden zwei LFE verwendet, die vor und nach einer 6 m langen Messstrecke angeordnet werden. Die Versuchsanordnung besteht aus zwölf zusammengesetzten Kanaldämmplatten, die den Lüftungskanal bilden. Aus der Differenz der gemessenen Luftvolumenströme kann die Leckage bestimmt werden. Zunächst wird die Messung ohne zusätzliche Abdichtung zwischen den zwölf aneinandergelegten Dämmplatten durchgeführt und anschließend mit verschiedenen Abdichtungsmaßnahmen wiederholt. Das Abkleben der Kanten mit Klebeband ist dabei dem verputzten Zustand des Wärmedämmverbund-System nachempfunden. In einer weiteren Untersuchung wird der Einsatz von doppelseitigem Klebeband im Bereich des Nut-und-Feder-Systems zwischen den Kanalplatten getestet, um einen luftdichten Anschluss zu gewährleisten.

4.3 Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an den dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen dargestellt und bewertet. Mithilfe der Messungen kann das strömungstechnische Verhalten der fassadenintegrierten Luftkanalführung analysiert und wichtige Einflussfaktoren für eine hydraulisch günstige Luftverteilung identifiziert werden.

4.3.1 Druckverlust dämmstoffintegrierter Luftkanäle

Gerade Luftkanäle

Um erste Rückschlüsse auf die Größenordnung der spezifischen Druckverluste der geraden dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle zu erhalten, wird der Druckverlust zunächst rechnerisch mithilfe der Formeln (2.3) bis (2.8) bestimmt. Der ovale Kanalquerschnitt wird als Rechteck mit Seitenlängen von 30 mm x 300 mm vereinfacht und die Länge des Kanals auf 1 m normiert. Der bislang unbekannte Rauigkeitswert der Kanaloberfläche wird zwischen Werten von 0,01 und 2,0 variiert. Dies entspricht der Rauigkeit gängiger Rohrmaterialien. In Abb. 44 sind die berechneten spezifischen Druckverluste der dämmstoffintegrierten Flachkanäle als Punkteschar dargestellt. Hier ist zu sehen, dass insbesondere bei höheren Rauigkeitswerten der resultierende Druckverlustkennwert stark ansteigt. Der typische Anwendungsbereich der Lüftungskanäle liegt bei etwa 25-50 m³/h. Für diese Volumenströme liegt der berechnete längenspezifische Druckverlust zwischen 0,4 Pa/m und 1,8 Pa/m.

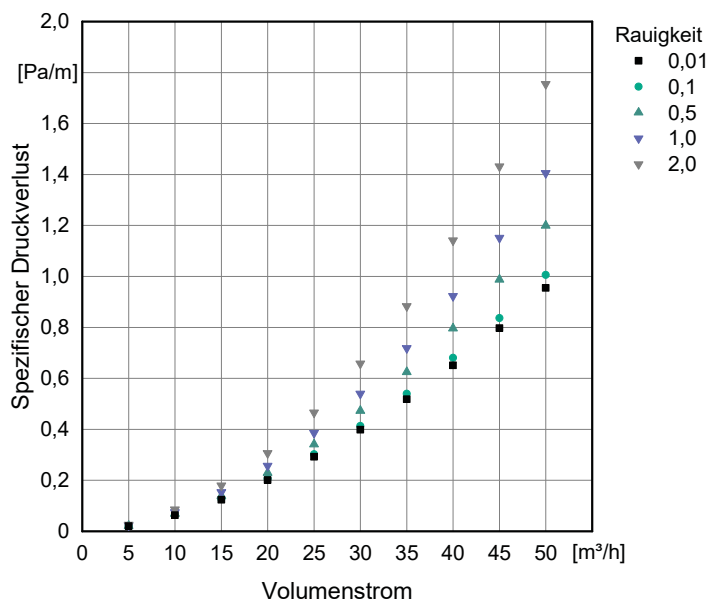


Abb. 44: Berechnete spezifische Druckverluste für rechteckige Flachkanäle gleicher Geometrie (30 mm x 300 mm) bei Variation der Rauigkeit ϵ

Die gemessenen spezifischen Druckverluste der geraden Kanaldämmplatten bei Durchströmung mit Überdruck sind für verschiedene Abdichtungsvarianten in untenstehender Abb. 45 bei Luftvolumenströmen von 5 m³/h bis 50 m³/h aufgeführt.

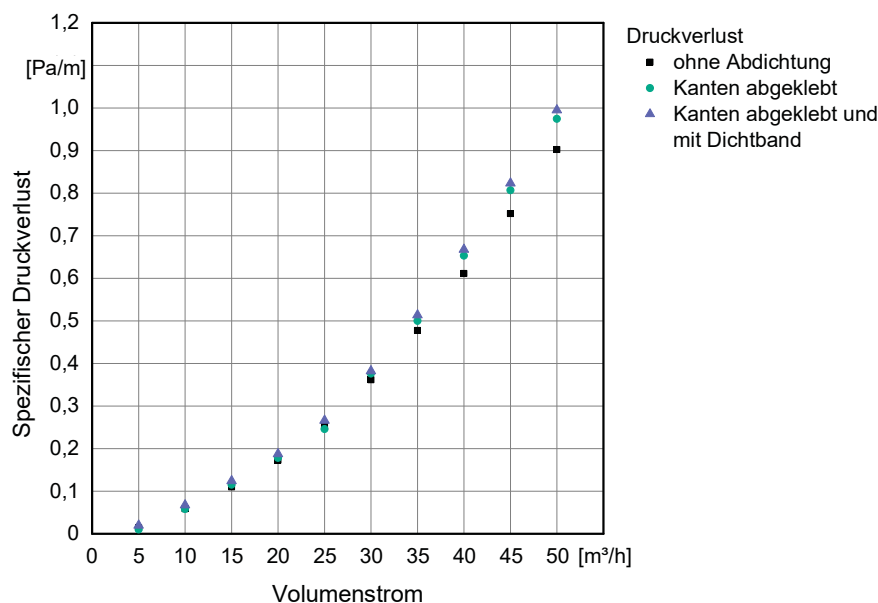


Abb. 45: Gemessener spezifischer Druckverlust der geraden Kanalplatten bei unterschiedlichen Abdichtungsvarianten

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass der gemessene Druckverlust bei losem Aneinanderlegen der Dämmplatten geringer ist als mit abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalfuge. Ohne Abdichtungsmaßnahmen zwischen den Dämmplatten kann über die Fugen am Kanal Luft entweichen, sodass die Luftgeschwindigkeit mit zunehmender Kanallänge sinkt und somit auch die damit verbundenen Druckverluste. Der gemessene spezifische Druckverlust mit abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalfuge mit einem doppelseitigen Klebestreifen beträgt bei einem Volumenstrom von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ etwa 1 Pa/m . In Abb. A 12 im Anhang sind beispielhaft die gemessenen spezifischen Druckverluste der abgeklebten Kanaldämmplatten mit abgedichteter Kanalfuge mit den Standardabweichungen der einzelnen Messpunkte aufgetragen. Die Druckverluste steigen quadratisch mit dem Volumenstrom an, allerdings ist bei kleineren Luftmengen bis etwa $25 \text{ m}^3/\text{h}$ ein flacherer Verlauf festzustellen. Dies ist auf die Art der Rohrströmung zurückzuführen. Bis zu einem Volumenstrom von $20 \text{ m}^3/\text{h}$ liegen Reynolds-Zahlen unterhalb der kritischen Grenze von 2.300 vor und es herrscht eine laminare Strömung. Ab einem Luftvolumenstrom von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bildet sich nach und nach eine turbulente Rohrströmung aus und die Reynolds-Zahlen, die sich aufgrund der Luftgeschwindigkeit, der Luftigenschaften und der gegebenen Rohrgeometrie einstellen, liegen oberhalb des kritischen Bereichs.

Mithilfe der gemessenen Druckverluste aus der oben aufgeführten Untersuchung werden nun geeignete Kennwerte für die Bewertung der fassadenintegrierten Kanalführung gebildet und anderen Rohrleitungssystemen gegenübergestellt. In Abb. 46 ist ein Vergleich der spezifischen Druckverluste der abgedichteten Luftkanäle mit den berechneten Druckverlusten eines Blechkanals bei gleichen geometrischen Abmessungen und einem Rauigkeitswert von $0,15 \text{ mm}$ dargestellt. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle führen zu nahezu gleichen Druckverlustkennwerten wie ein herkömmlicher Blechkanal. Die Oberfläche des expandierten Polystyrols weist somit gleiche hydraulische Eigenschaften auf wie gefalztes Blech.

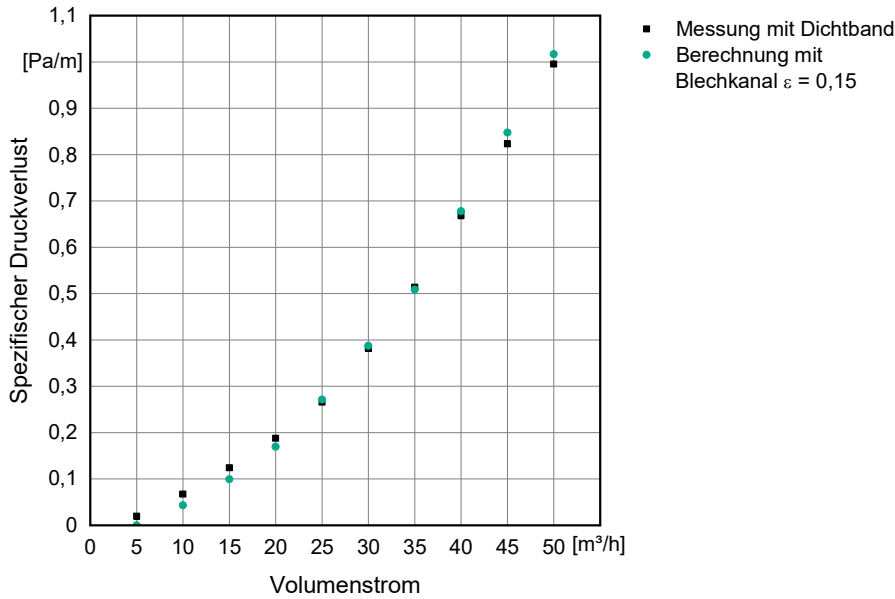


Abb. 46: Gemessener spezifischer Druckverlust der abgedichteten Luftkanäle mit einem Dichtband und berechnete Druckverluste für einen Blechkanal mit $\epsilon=0,15$, siehe auch [Ziegler und Krause 2013]

90°-Umlenkung/Kniestück

Der gemessene Druckverlust dreier Kanalstücke der 90°-Umlenkung bei Durchströmung mit Überdruck gemäß dem Aufbau aus Abb. 42 ist in nachstehender Abb. 47 zu sehen.

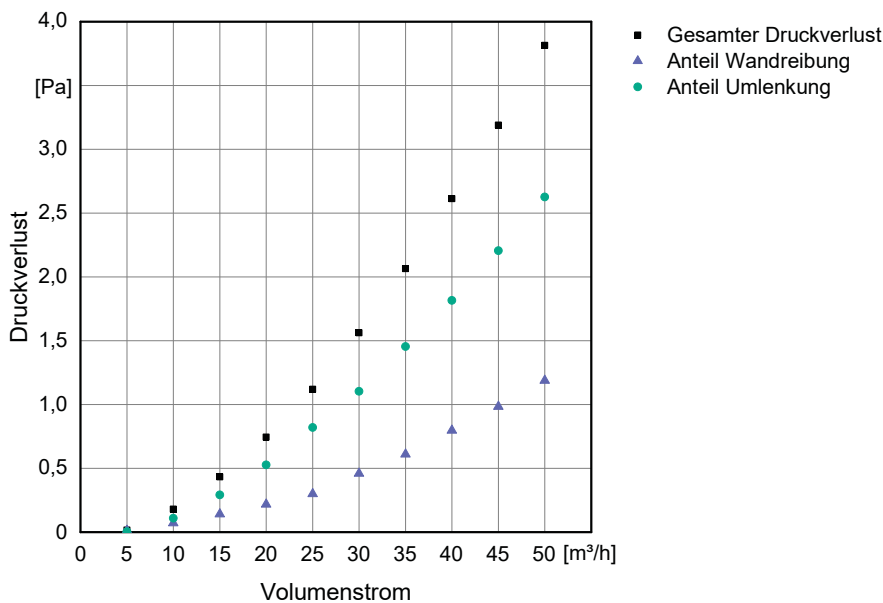


Abb. 47: Gemessener Druckverlust der 90°-Umlenkung und berechnete Anteile, die sich aufgrund der Durchströmung der geraden Kanalstrecke und der Umlenkung ergeben

Neben dem Gesamtdruckverlust sind in Abb. 47 außerdem die Anteile des Druckverlusts dargestellt, die sich aufgrund der Durchströmung der geraden Kanalstrecke sowie der Umlenkung einstellen. Das vermessene Kniestück besteht aus insgesamt drei aneinandergelegten Platten.

Die Länge des durchströmten Lüftungskanals des Anschlussstücks wird mit dem spezifischen Druckverlust der geraden Kanalplatten (siehe Ergebnisse aus Abb. 46) multipliziert und vom gemessenen Gesamtdruckverlust subtrahiert. Die Differenz der beiden Werte stellt den zusätzlichen Druckverlust dar, der durch die Umlenkung verursacht wird. Der Druckverlustanteil, der sich aufgrund der Umlenkung einstellt, ist in der durchgeführten Versuchsanordnung deutlich höher als der Beitrag der Wandreibung und liegt in der Größenordnung von einer geraden Kanalstrecke mit etwa 2,5 m Länge.

Der Umlenkungsanteil des gemessenen Druckverlusts des Kniestücks ist zusammen mit dem berechneten Druckverlust für ein Kniestück mit einem Widerstandsbeiwert von 1,16 nach [Wagner 2012] in Abb. 48 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die vermessene Umlenkung zu höheren Druckverlusten führt, als die theoretischen Ansätze prognostizieren. Aus der experimentell bestimmten Druckverlustkurve wird der Widerstandsbeiwert über eine quadratische Regression gemäß Formel (4.5) ermittelt. Der Regressionskoeffizient des linearen Terms und der Ordinatenabschnitt werden auf null fixiert. Der Widerstandsbeiwert ergibt sich zu einem Wert von 1,93. Der Grund für die höheren Druckverluste ist die ungünstige Versuchsanordnung des Anschlussstücks (siehe Abb. 42). Der dämmstoffintegrierte Lüftungskanal läuft nach dem rechtwinkligen Anschluss der Kanalplatte gegen ein geschlossenes Ende, das zusätzliche Verwirbelungen bewirkt.

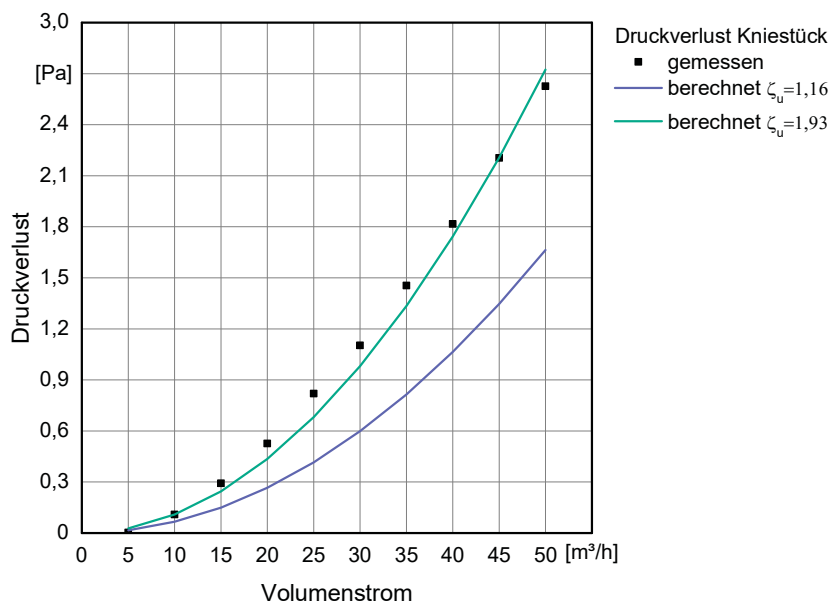


Abb. 48: Gemessener Druckverlust des Kniestücks und berechneter Druckverlust für unterschiedliche Widerstandsbeiwerte ζ_u

Wandanschluss

Ein strömungsgünstiger Anschluss des Lüftungskanals an den Raum ist wichtig, um den Systemdruckverlust in den einzelnen Strängen zu begrenzen. Der Anschluss der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle an den Wohnraum erfolgt über eine Kernbohrung. Dabei wird der Steg im Kanalzwischenraum entfernt, um beide Teilkanäle anzuzapfen. Anschließend kann das Kunststoffrohr in die Bohrung eingesetzt werden. Bei scharfkantigen Umlenkungen treten neben

den Reibungsverlusten zusätzliche Umlenkverluste durch Strömungsablösungen und Querströmungen auf. In Umlenkungen von Rohrbögen in Rund- und Rechteckkanälen werden daher häufig Leitbleche eingebaut. Dies ist jedoch bei der hier vorliegenden Kanalgeometrie mit einem Flachkanalquerschnitt von 30 mm x 300 mm nicht umsetzbar.

Die Druckverlustmessung des Wandanschlusses wird mit zwei unterschiedlichen Prüfkörpern durchgeführt. Bei der ersten Einbaumöglichkeit wird das 30 cm lange Verbindungsrohr, das der Tiefe einer durchschnittlichen Bestandsaußenwand entspricht, bündig an den Flachkanal gesetzt, sodass keine Kanten und Einbauten in den Flachkanalquerschnitt ragen. Die zweite Anschlussart sieht vor, dass das Kunststoffrohr um den halben Umfang ausgeschnitten wird und sich somit ein Teil des Verbindungsstücks im Flachkanal befindet. In Abb. 49 sind die beiden vorgeschlagenen Einbaumöglichkeiten des Kunststoffrohres dargestellt.

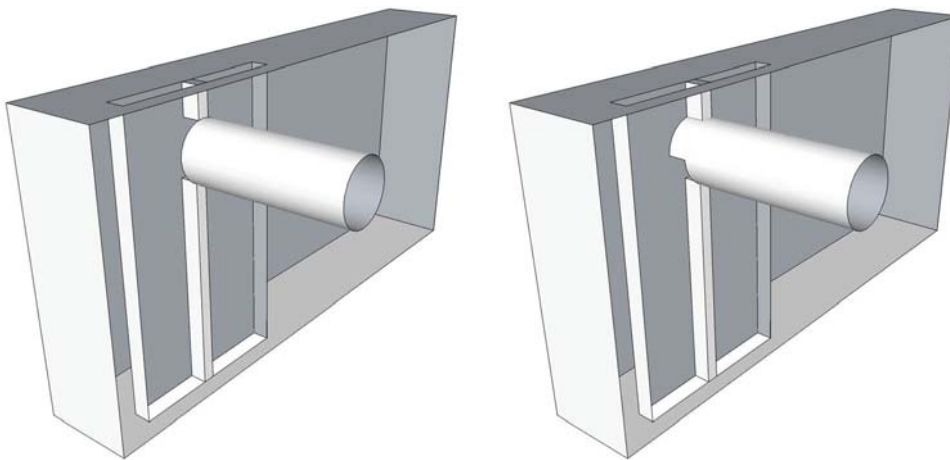


Abb. 49: Einbaumöglichkeiten des Verbindungsrohrs an den Lüftungskanal am Wandanschlussstück mit bündigem Anschluss (links) und mit angeschnittenem Kunststoffrohr

Die beiden Prüfkörper werden jeweils mit Über- und Unterdruck durchströmt, was dem Einsatz als Zuluft- bzw. Abluftkanal entspricht. Der obere Abschluss des Luftkanals wird mit dicht schließendem Klebeband abgedichtet. Die Druckmessstellen am Ein- und Auslass des Lüftungskanals befinden sich jeweils mittig am Teilkanal, sodass der mittlere statische Druck des Kanalelements gemessen wird. Am Kunststoffrohr befindet sich keine Druckmessstelle, hier wird der Umgebungsdruck herangezogen. Der gemessene Druckverlust des Wandanschlussstückes für beide Einbauarten ist in Abb. 50 dargestellt. Die Konfiguration mit bündiger Anordnung weist bei Durchströmung mit Über- und Unterdruck geringere Druckverluste auf als das Anschlussstück mit angeschnittenem Rohr. Der Grund hierfür ist die in den Kanal ragende Rohrkante, die zu höheren Verwirbelungen und somit zu einem ungünstigeren Strömungsprofil führt. Für beide Anschlussarten liegen die Druckverluste bei Unterdruck etwa 3-4 Pa über den Werten bei Überdruck. Der Rohrauslauf zeigt somit ein hydraulisch günstigeres Strömungsverhalten als der Rohreinlauf. Dies deckt sich auch mit den berechneten Tabellenwerten für Querschnittsveränderungen von Rohrleitungen nach [Glück 1988].

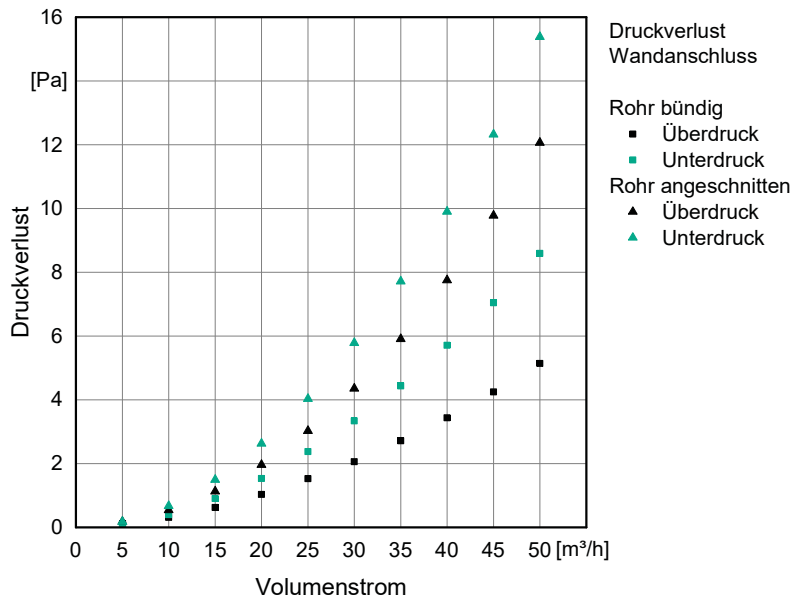


Abb. 50: Gemessener Druckverlust des Wandanschlusses bei unterschiedlicher Durchströmung und Ausführung mit bündigem Anschluss und mit angeschnittenem Rohr

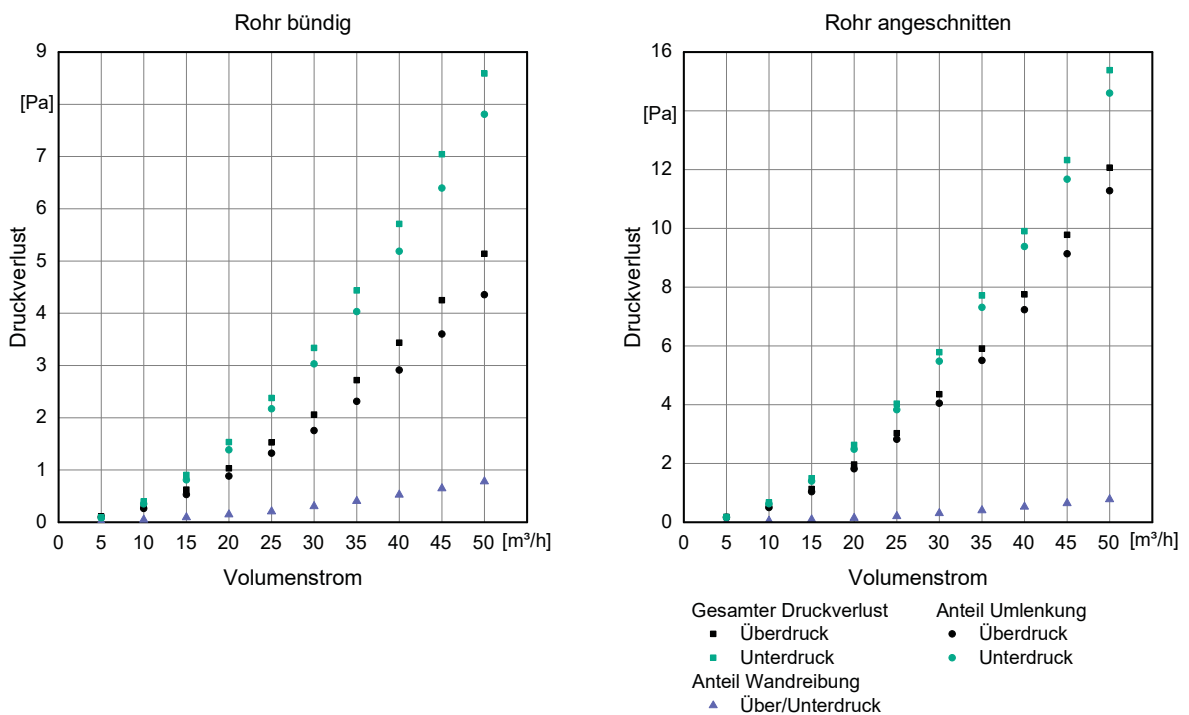


Abb. 51: Gemessener Druckverlust der Wandanschlussstücke bei Über- und Unterdruck für die beiden Rohrkonfigurationen und berechnete Anteile, die sich aufgrund der Wandreibung der Kanalstrecke und des Anschlusses ergeben

Der Anteil des gemessenen Druckverlusts, der auf die Durchströmung des dämmstoffintegrierten Kanals und des 30 cm langen Kunststoffrohrs zurückzuführen ist, wird von den Gesamtdruckverlusten der jeweiligen Konfiguration abgezogen und zusammen mit der verbleibenden Differenz getrennt für beide Einbauarten in Abb. 51 dargestellt. Für beide vermessenen Anschlüsse liegt der Druckverlustanteil, der sich durch die Umlenkung ergibt, um ein Vielfaches über dem Anteil, der durch die Wandreibung verursacht wird.

Das Anschlussstück zwischen Lüftungskanal und Raum führt in Abhängigkeit der Durchströmungsrichtung sowie Anordnung des Verbindungsrohres zu einem unterschiedlichen hydraulischen Verhalten. Abb. 52 enthält die gemessenen Druckverluste der verschiedenen Konfigurationen und die jeweils daraus berechneten Druckverlustkurven, die sich durch Approximation über eine quadratische Regression einstellen. Im Vergleich zum Kniestück stellen sich beim Wandanschluss weitaus höhere Widerstandsbeiwerte ein. Der Wandanschluss beeinflusst demnach den Gesamtdruckverlust jedes einzelnen Kanalstrangs stärker. Dies kann auch ein Grund dafür sein, warum die gemessenen Druckverluste in Kapitel 3.4.2 im Abluftstrang des Testgebäudes deutlich höher liegen als die des Zuluftstrangs.

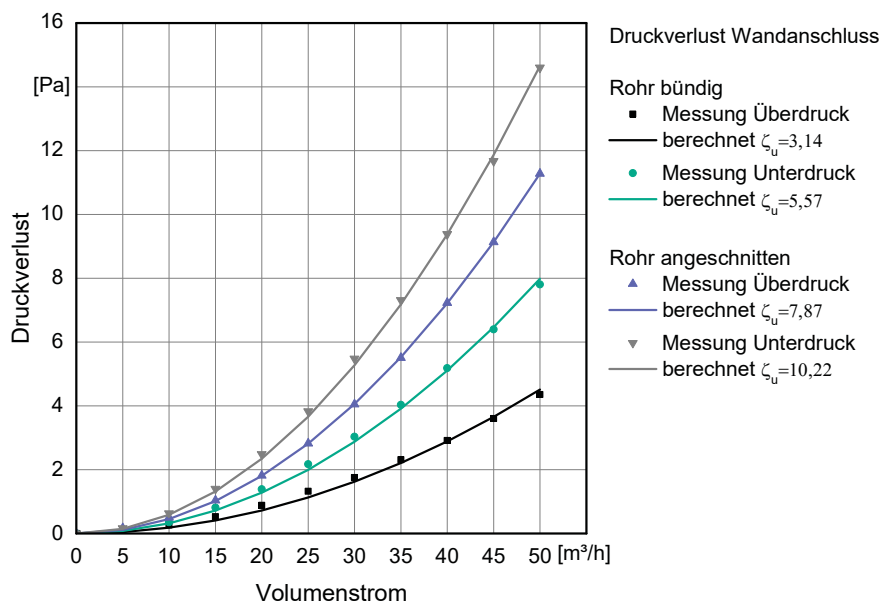


Abb. 52: Gemessene Druckverluste des Wandanschlusses bei unterschiedlicher Durchströmung und Rohrkonfiguration und berechnete Druckverlustkurven

4.3.2 Messung der Undichtigkeit der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle

Voruntersuchungen

Die Messung des Leakagevolumenstroms der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle erfolgt mit zwei unterschiedlich großen Laminarstromelementen (LFE) des gleichen Herstellers (LFE Größe 4, Innendurchmesser 58 mm, LFE Größe 5, 78 mm), die jeweils vor und nach der Kanal-messstrecke angeordnet werden. Zunächst werden Voruntersuchungen bei unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt, um Aussagen über die Messgenauigkeit der beiden Durchflussmessgeräte treffen zu können. Dabei werden die Position der LFE, die Durchströmungsrichtung sowie die Ein- und Auslaufstrecken variiert. Für diese Referenzmessungen werden die beiden LFE ohne Prüfkörper mit einem handelsüblichen HT-Rohr miteinander verbunden, abgedichtet und mit einem Luftvolumenstrom von 5-50 m³/h in jeweils 5-m³/h-Schritten durchströmt. Gemäß der Massenerhaltung liegt an beiden LFE das gleiche Durchsatzvolumen vor. Da jedoch jeweils am LFE ein geringer Druckabfall stattfindet, kann der Einbau des Messgeräts die Bestimmung des Volumenstroms geringfügig beeinflussen. Laut Herstellerangaben reichen bereits Einlaufstrecken aus, die mindestens 2-3-mal so lang sind wie

der Durchmesser des LFE, um eine ausreichend genaue Bestimmung des Volumenstroms zu erzielen. Vor dem Eintritt in das LFE sollten sprungartige Querschnittsänderungen vermieden werden, um eine laminare Einströmung in das Durchflussmessgerät zu gewährleisten. Die Bezeichnung der verschiedenen Konfigurationen mit den Einlaufängen erfolgt nach untenstehendem Schema gemäß Abb. 53.

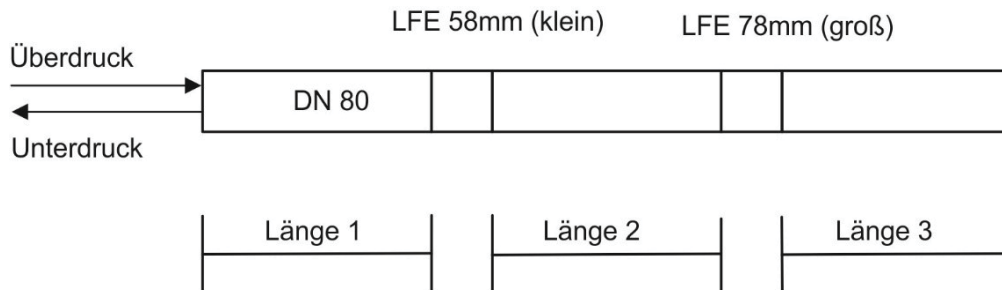


Abb. 53: Schematische Darstellung des Aufbaus für die Referenz-Volumenstrommessung mit unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken

Die im Folgenden dargestellten Referenzmessungen sind alle mit der gleichen Anordnung der LFE durchgeführt. Das heißt, das kleine LFE befindet sich, wie in Abb. 53 dargestellt, vor dem großen LFE. Die Längen sind jeweils in cm angegeben. In Abb. 54 sind die Volumenstromverhältnisse zwischen dem hinteren großen LFE im Vergleich zum vorderen kleinen LFE über dem eingestellten Volumenstrom dargestellt. Es ist zu sehen, dass der gemessene Volumenstrom am kleinen LFE stets höhere Werte aufweist als am großen LFE. Der Verlauf des gemessenen Durchflussverhältnisses über dem eingestellten Volumenstrom zeigt eine gleichartige Tendenz und führt bei kleinen Luftmengen zu geringeren Werten und steigt dann auf Werte von etwa 95-97 % an. Es ist keine Abnahme der relativen Abweichung zwischen den LFE bei größeren Ein- und Auslaufstrecken festzustellen. Für die Unterdruckmessung führt eine längere Einlaufstrecke (hier: Länge 3) jedoch zu einem gleichmäßigeren Verlauf und zu höheren Volumenstromverhältnissen. Die Einströmung in das LFE scheint hier zu einem günstigeren Strömungsprofil zu führen.

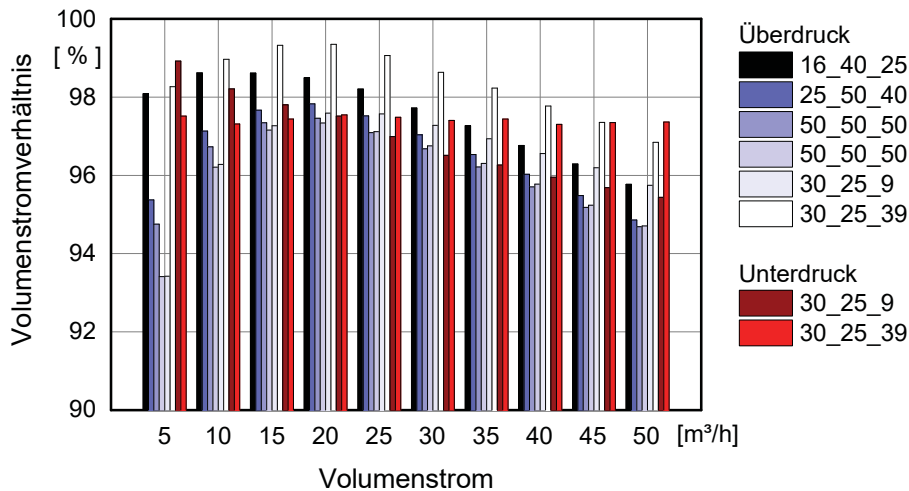


Abb. 54: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse der beiden LFE bei unterschiedlichen Einlaufstrecken und Durchströmungsrichtungen

Aus den durchgeführten Referenzmessungen lässt sich der absolute Leckagevolumenstrom bestimmen. In Abb. A 13 im Anhang sind die gemessenen absoluten Volumenstromdifferenzen der untersuchten Konfigurationen dargestellt. Vergleicht man diese, so zeigt sich bei den Messungen mit Überdruck ein quadratischer Anstieg der Leckage mit steigendem Volumenstrom. Die Messungen bei Unterdruck führen hingegen zu einem flacheren Verlauf.

Der Einfluss der Positionierung der beiden LFE ist in der nachstehenden Abb. 55 zu sehen. Für zwei unterschiedliche Konfigurationen von Ein- und Auslaufstrecken wird das große LFE einmal nach vorne und einmal nach hinten gesetzt. Anhand der gemessenen Volumenstromverhältnisse ist kein systematischer Zusammenhang zwischen der LFE-Anordnung und dem daraus resultierenden Verhältnis der gemessenen Volumenströme zu erkennen.

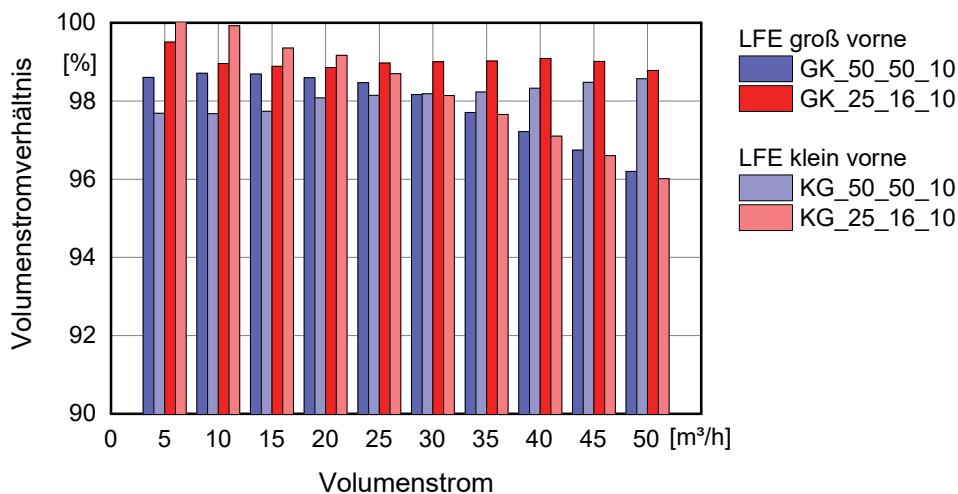


Abb. 55: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse für unterschiedliche Einlaufstrecken und Anordnung der LFE bei Überdruck

Um einen systematischen Fehler bei der Messung der Volumenströme an beiden LFE auszuschließen, werden die an den jeweiligen LFE aufgezeichneten Luftmengen für alle Referenzmessungen in einem Diagramm einander gegenübergestellt. In Abb. 56 sind die gemessenen Luftvolumenströme aller Referenzmessungen dargestellt. Der Volumenstrom am LFE Größe 4 (58 mm) ist jeweils auf der Abszisse zu sehen und der entsprechende Volumenstrom, der mit dem LFE Größe 5 (78 mm) bestimmt wurde, ist auf der Ordinate ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass für alle durchgeführten Referenzmessungen der am LFE (78 mm) gemessene Volumenstrom geringer ist als der am LFE (58 mm). Die dadurch entstehenden Abweichungen müssen für weitere Untersuchungen zunächst korrigiert werden.

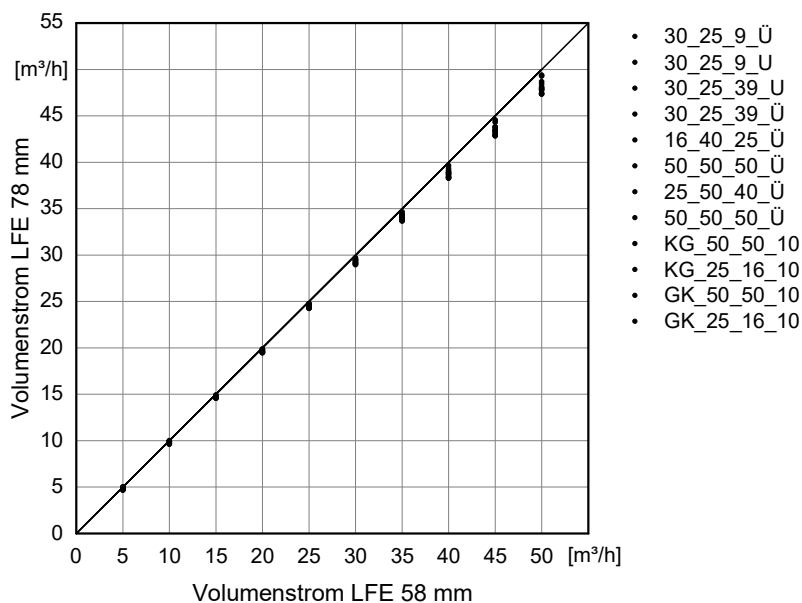


Abb. 56: Vergleich der gemessenen Volumenströme aller Referenzmessungen beider LFE (58 mm und 78 mm)

Die gemessenen Abweichungen der Referenzmessungen werden statistisch ausgewertet, um die Leckagemessung für die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle korrigieren zu können. Dazu werden die Mittelwerte der gemessenen Volumenstromverhältnisse aller Referenzmessungen gebildet und die Standardabweichung bestimmt. In Abb. 57 sind die Mittelwerte der gemessenen Volumenstromverhältnisse zwischen den LFE dargestellt. Die Fehlerbalken um den Mittelwert beschreiben die Standardabweichung der Referenzmessung. Die Unsicherheit der Referenzmessung sinkt mit steigendem Volumenstrom und nimmt ab etwa 25 m³/h wieder zu. Die mittleren absoluten Leckagevolumenströme und deren Standardabweichung sind im Anhang in Abb. A 14 veranschaulicht.

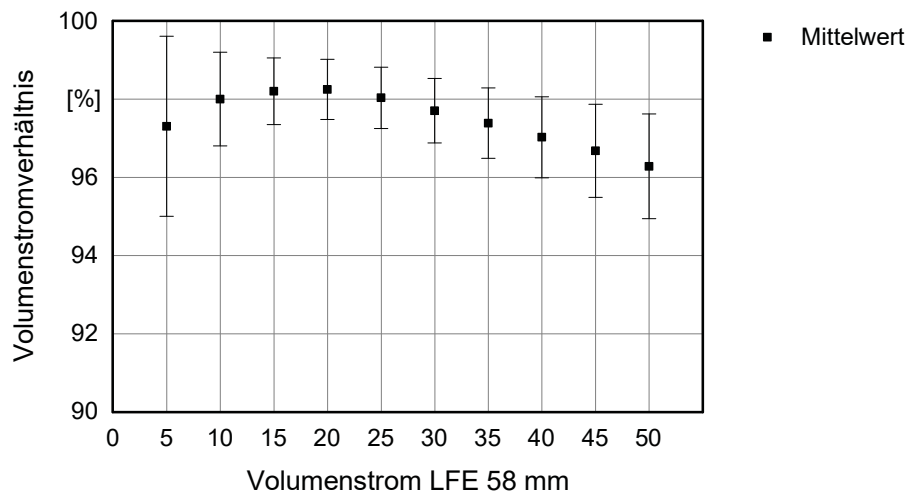


Abb. 57: Mittleres gemessenes Volumenstromverhältnis aller Referenzmessungen mit Fehlerbalken der Standardabweichung

Messung der Undichtigkeit der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle

Die Leckagerate der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle wird für eine Messstrecke von 6 m Länge ermittelt. Die Messung wird dabei mit verschiedenen Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt. Zunächst werden die einzelnen Kanaldämmplatten nur lose aneinandergelegt und anschließend werden die Kanten zwischen den Platten mit dichtschießendem Klebeband verschlossen. In einer weiteren Variante wird im Bereich der Kanalfuge zwischen den einzelnen Dämmplatten eine Abdichtung mit einem doppelseitig klebenden zweiseitigen Dichtband eingesetzt. Das kleine LFE befindet sich immer vor und das große LFE hinter der Messstrecke. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle werden sowohl mit Unter- als auch Überdruck durchströmt. Eine schematische Darstellung der Positionierung der LFE sowie die Bezeichnung der Einlaufstrecken ist in Abb. 58 zu sehen.



Abb. 58: Schematische Darstellung des Aufbaus der Volumenstrommessung mit unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken

In Abb. 59 ist das gemessene Volumenstromverhältnis an den beiden LFE bei Unter- und Überdruck und mit unterschiedlichen Abdichtungsmaßnahmen dargestellt. Hier ist zu sehen, dass bei losem Aneinanderlegen der Platten nur etwa 40-45 % der Luftmenge über den dämmstoffintegrierten Lüftungskanal transportiert wird und der restliche Anteil über die Fugen entweichen kann. Durch das Abkleben der Kanten zwischen den Einzelplatten erhöht sich das Volumenstromverhältnis auf 72-75 %, sodass noch etwa ein Viertel der Luftmenge entweicht.

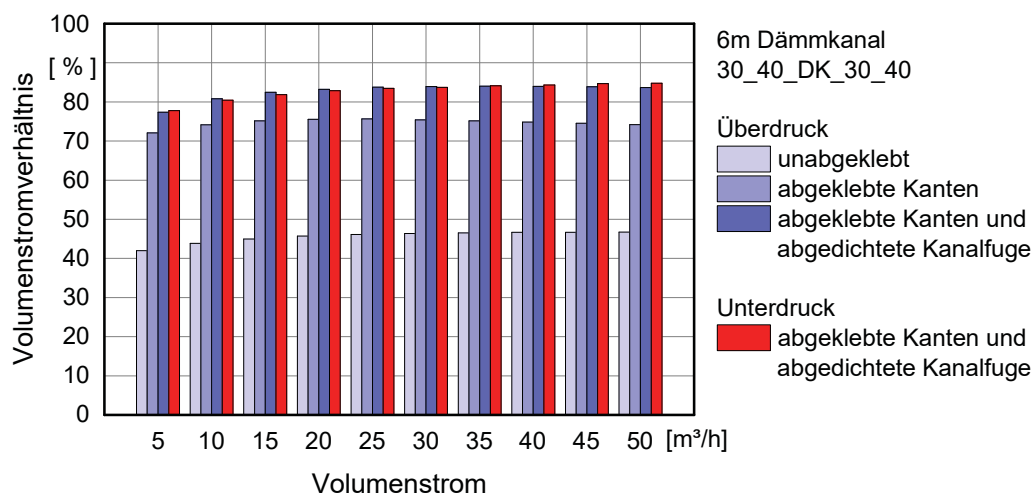


Abb. 59: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse der beiden LFE bei unterschiedlicher Abdichtung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und bei Variation der Durchströmungsrichtung

Durch eine zusätzliche Abdichtung im Bereich der Kanalfuge zwischen den zusammengesetzten Platten steigt das Volumenstromverhältnis auf einen Wert von etwa 83 % an. Die Messung bei Über- und Unterdruck führt bei dieser Abdichtungsvariante jeweils zu gleichen Ergebnissen. Der Leckagevolumenstrom als Differenz aus den gemessenen Luftmengen an den beiden LFE für die oben beschriebenen Varianten ist im Anhang in Abb. A 15 zu finden. Im Vergleich zu den nicht abgeklebten Kanaldämmplatten reduziert sich der Leckagevolumenstrom bei abgeklebten Kanten zwischen den Platten und abgedichteter Kanalfuge um über zwei Drittel.

Bewertung der gemessenen Undichtigkeit der Kanaldämmplatten

Die gemessenen Volumenstromverhältnisse und Leckageluftmengen der Dämmstoffkanäle enthalten noch die Messunsicherheit, die sich aus dem Fehler bei der Bestimmung des Luftvolumenstroms an den beiden LFE ergeben. Eine Korrektur erfolgt durch die Bewertung mit den Referenzmessungen unter Berücksichtigung der hierbei gemessenen Unsicherheit. Dazu werden die Mittelwerte der Leckagevolumenströme der Referenzmessungen von den Leckagewerten der Messung der Dämmstoffplatten subtrahiert. Die dabei aufgetretene Unsicherheit wird über die Fehlerfortpflanzung nach Gauß [DIN 1319-3] berücksichtigt. Die Addition des absoluten Fehlers ergibt sich allgemein zu:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2} \quad (4.6)$$

Der Gesamtfehler σ_f berechnet sich aus der Standardabweichung der Leckagemessung σ_{x1} sowie aus dem Fehler der Referenzmessungen σ_{x2} . Die korrigierten und bewerteten absoluten Leckagevolumenströme und die relative Abweichung beider LFE sind in Abb. A 16 dargestellt.

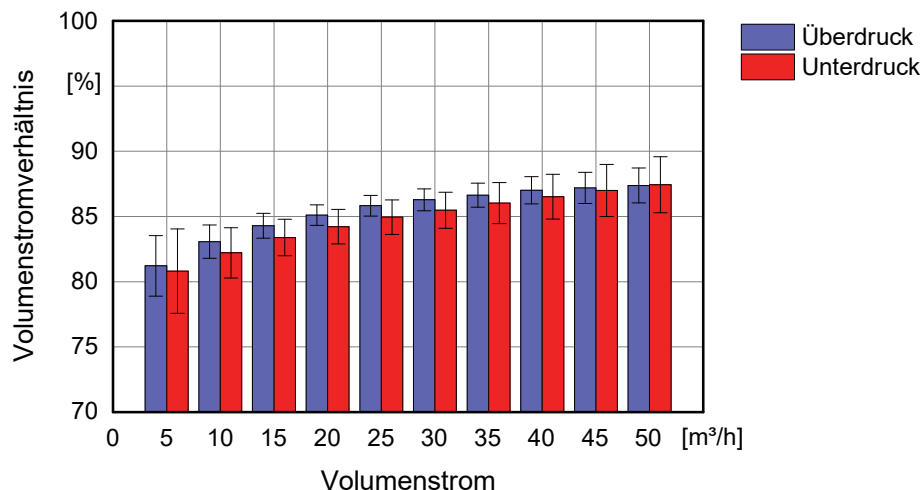


Abb. 60: Gemessenes Volumenstromverhältnis der beiden LFE für eine Messstrecke der Dämmstoffkanäle von 6 m bei abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalfuge für Durchströmung mit Über- und Unterdruck mit Angabe der Messunsicherheit

Weitere mögliche Fehlerquellen bei der Messung des Volumenstroms stellen das Differenzdruckmessgerät und die Datenkarte zur Verarbeitung der Messsignale dar. Die gemessenen Abweichungen liegen jedoch weit über den Genauigkeitswerten der Datenkarte ($\pm 0,76\%$) und des Differenzdruckmessgeräts ($\pm 0,5\%$).

Die Referenzmessungen mit den Einlaufängen gemäß Abb. 53 führen auf vergleichsweise hohe Abweichungen zwischen den gemessenen Volumenströmen der beiden LFE. Aus diesem Grund werden neue Referenzmessungen mit längeren Ein- und Auslaufstrecken und angepassten Querschnitten vor dem Eintritt in das Durchflussmessgerät durchgeführt, um eine laminare Einströmung in das LFE zu gewährleisten. Die Messkanalstrecke und deren Abmessungen sind in Abb. 61 zu sehen.

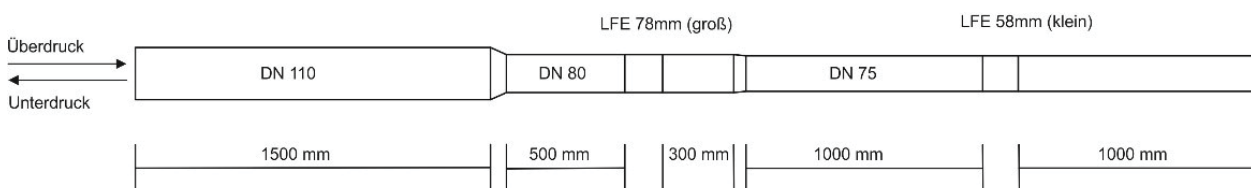


Abb. 61: Messanordnung für die Bestimmung des Luftvolumenstroms an beiden LFE mit längeren Einlaufstrecken und optimierter Kanalgeometrie

Die relative Abweichung der gemessenen Volumenströme beider LFE in der Referenzmessung wird zusammen mit den mittleren relativen Abweichungen der Referenzmessungen aus Abb. 54 aufgezeigt. In Abb. 62 sind die relativen Abweichungen der gemessenen Volumenströme bei unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken gegenübergestellt. Die Messanordnung mit längeren Ein- und Auslaufängen führt zu deutlich geringeren Abweichungen. Diese liegen etwa zwischen 0,2 % und 1,5 %. Die Messungen mit kurzen Beruhigungsstrecken führen auf Werte zwischen 1,7 % und 3,7 %.

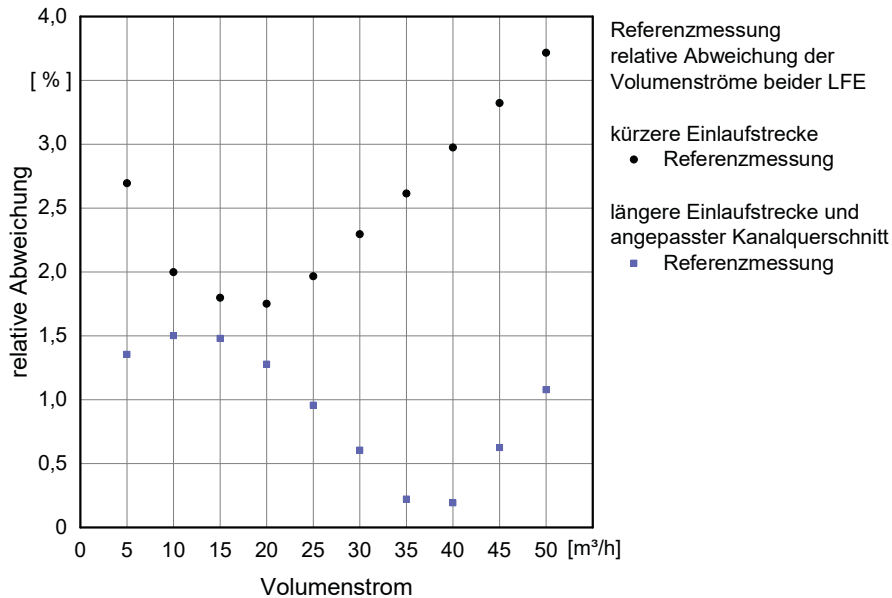


Abb. 62: Vergleich der relativen Abweichung der gemessenen Volumenströme an beiden LFE bei unterschiedlich langen Einlaufstrecken

Mithilfe der Messanordnung und längeren Einlaufstrecken und angepassten Kanalquerschnitten vor dem Einlauf in das LFE wird die Leckagerate der Dämmkanalplatten erneut bestimmt. Aufgrund der begrenzten Laborfläche wird nur eine Kanalplatte (Länge des Dämmstoffkanals: 500 mm) für die Messung verwendet. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 63 dargestellt.

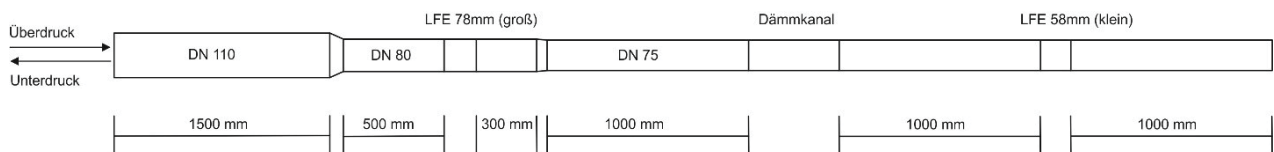


Abb. 63: Messanordnung für die Bestimmung der Leckagerate einer Dämmkanalplatte mit längeren Einlaufstrecken und optimierter Kanalgeometrie

Die Messung des Luftvolumenstroms vor und nach der Dämmkanalplatte wird auch mit der zuvor beschriebenen Versuchsanordnung mit kürzeren Ein- und Auslaufstrecken gemäß Abb. 53 durchgeführt. Der Vergleich der Volumenstromverhältnisse an den beiden LFE vor und nach einer Dämmkanalplatte bei Messkonfiguration mit langen und kurzen Beruhigungsstrecken ist in Abb. 64 dargestellt. Wird der gemessene Volumenstrom vor und nach der Kanaldämmplatte betrachtet, so führt die Messung mit längerer Ein- und Auslaufstrecke zu höheren Volumenstromverhältnissen über den gesamten Messbereich. Diese steigen mit höher werdendem Volumenstrom bis auf etwa 95,5 % an. Bei den kürzeren Beruhigungsstrecken beträgt das maximale Verhältnis zwischen dem gemessenen Volumenstrom vor und hinter dem Prüfkörper 92 %.

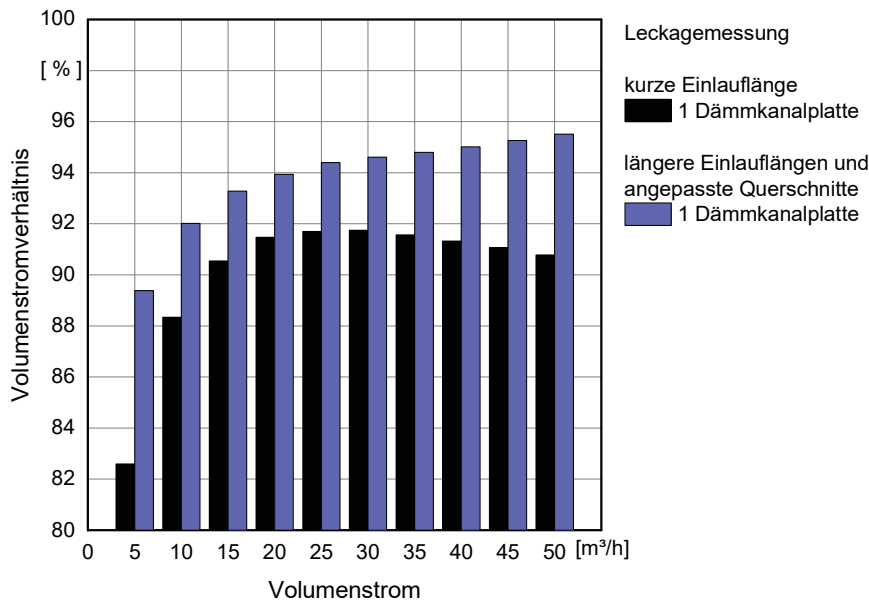


Abb. 64: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse an beiden LFE vor und nach einer Dämmkanalplatte bei unterschiedlich langen Ein- und Auslaufängen

4.4 Zusammenfassende Bewertung

Die derzeitigen Kenntnisse über das strömungstechnische Verhalten der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle sind unzureichend, um die Kanalführung auf der Fassade für unterschiedliche Gebäude planen und dimensionieren zu können. Um diesen Defiziten entgegenzuwirken, erfolgte in diesem Kapitel eine messtechnische Analyse der geraden Dämmkanalplatten und ausgewählter Anschlussstücke. Die hierbei erzielten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen liefern genaue Werte über die spezifischen Druckverluste und Druckverlustbeiwerte der Umlenkungen und Anschlussdetails.

Der gemessene längenspezifische Druckverlust für die geraden Dämmkanalplatten beträgt bei einem Luftvolumenstrom von 50 m³/h etwa 1 Pa/m. Die Kanten zwischen den zwölf aneinandergelegten Paneelen waren dabei abgeklebt und die Fuge im Bereich der Kanäle mit einem Dichtband verschlossen. Der berechnete Druckverlust eines Blechkanals mit einem Rauigkeitswert von $\epsilon=0,15$ und gleichen geometrischen Abmessungen (Querschnitt: 30 mm x 300 mm) führt auf nahezu identische Werte. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle weisen demnach die gleichen hydraulischen Eigenschaften auf wie ein Blechkanal mit gleicher Geometrie.

Die für die Kanalverlegung auf der Fassade notwendigen Anschlussdetails, wie ein Kniestück und ein Anschlussstück zwischen dem vertikalen Fassadenkanal und dem Innenraum, werden im Rahmen dieser hydraulischen Untersuchungen vermessen. Aus den gemessenen Gesamtdruckverlusten werden jeweils die Anteile der geraden Kanalstücke abgezogen und aus dem verbleibenden Anteil über eine quadratische Regression der Druckverlustbeiwert bestimmt. Der gemessene Widerstandsbeiwert für das Kniestück liegt bei 1,93 und somit höher als bei einem vergleichbaren Anschlussdetail ähnlicher Geometrie. Grund für den höheren Wert ist unter anderem die Messanordnung, da der Lüftungskanal neben der Umlenkung auf ein geschlossenes Ende führt. Das untersuchte Wandanschlussdetail ist unsymmetrisch und zeigt daher je nach

Durchströmungsrichtung unterschiedlich hohe Druckverluste. Dies ist auch ein Grund dafür, warum am Demonstrationsgebäude der Abluftstrang einen deutlich höheren Druckverlust aufweist als der Zuluftstrang. Die bündige Anordnung des runden Kunststoffrohrs an den dämmstoffintegrierten Kanal zeigt generell ein hydraulisch günstigeres Verhalten als ein angeschnittenes Rohr mit in den Querschnitt ragender Kante. Für die Anwendung als Zuluftkanal führt die Messung mit bündiger Anordnung auf einen Druckverlustbeiwert von 3,14 und bei umgekehrter Durchströmung im Falle eines Abluftkanals auf einen Wert von 5,57. Die Werte für die Einbaumöglichkeit mit angeschnittenem Verbindungsrohr liegen deutlich höher.

Für die Bestimmung der Leckagevolumenströme der Dämmkanalplatten werden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Einlauflängen, der Anordnung der LFE sowie der Durchströmungsrichtung aufzuzeigen. Die geringsten relativen Abweichungen zwischen den gemessenen Volumenströmen an den beiden LFE von maximal 1,5 % erhält man mit Ein- und Auslauflängen von mindestens 1 m. Die Abdichtung zwischen den dämmstoffintegrierten Kanälen mit doppelseitig klebendem zweispurigem Dichtband erweist sich bei der Analyse des Leckagevolumenstroms am wirkungsvollsten. Die gemessene mittlere Leckagerate beträgt hierbei etwa 6 %.

5 Gesamtenergetische Bilanzierung mit thermisch-hydraulisch gekoppelter Gebäudesimulation

5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus den Untersuchungen der Kapitel 3 und 4 konnten bereits wichtige energetische und hydraulische Kennwerte sowie praxisrelevante Aspekte für das Sanierungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse aus der messtechnischen Analyse am Demonstrationsgebäude und der detaillierten strömungstechnischen Bewertung der dämmstoffintegrierten Kanäle sollen nun in einer gesamtenergetischen Bilanzierung zusammengeführt werden.

Ziel dieses Kapitels ist es somit, das thermische und energetische Verhalten des Demonstrationsgebäudes inklusive des fassadenintegrierten Lüftungssystems mithilfe von dynamischen Systemsimulationen zu analysieren und die Leistungsfähigkeit des Sanierungssystems zu bestimmen. Durch die Identifizierung der entscheidenden Einflussparameter und deren Auswirkungen auf die gesamtenergetische Bilanz des Gebäudes kann das Sanierungssystem gezielt weiterentwickelt werden.

Zunächst wird das Testgebäude in Kassel in der Simulationsumgebung TRNSYS 17 abgebildet. Hierfür wird ein Modell der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle entwickelt, das die Wärmeübertragungsvorgänge zwischen der strömenden Luft und der Kanaloberfläche ausreichend exakt wiedergibt. Die Überprüfung des thermischen Luftkanalmodells erfolgt durch den Abgleich mit realen Messdaten aus den Voruntersuchungen in Kapitel 3. Mithilfe eines Luftströmungsmodells [TRNflow 2006] werden die Luftmengen in den einzelnen Räumen der beiden Wohneinheiten berechnet und das hydraulische Verhalten des Luftkanalnetzes bestimmt. Die gemessenen Druckverlustkennwerte der Kanalplatten sowie der Anschlussstücke aus den strömungstechnischen Untersuchungen werden dabei als Eingangsparameter für die Simulation berücksichtigt.

Das Gesamtsystem, bestehend aus dem Gebäude, dem Modell der fassadenintegrierten Luftkanalführung und dem hydraulischen Luftströmungsmodell, ermöglicht dann eine gesamtenergetische Bewertung unter standardisierten Randbedingungen. Die entscheidenden Faktoren zur Optimierung des neuartigen Lüftungssystems können im Anschluss daran über eine Sensitivitätsanalyse bestimmt werden.

5.2 Beschreibung des verwendeten Simulationsprogramms

Die Berechnungen für das zu untersuchende Gebäude werden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS 17¹⁷ durchgeführt. Eine genaue Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus des Programms sowie der mathematischen und physikalischen Zusammenhänge ist in [TRNSYS 2012] zu finden.

TRNSYS 17

Die Simulationsumgebung TRNSYS 17 ist modular aufgebaut und dient zur Abbildung von komplexen thermodynamischen Energiesystemen wie beispielsweise gebäude- und anlagentechnischen Systemen. Innerhalb der Programmstruktur können verschiedene Unterprogramme, sogenannte Types, erstellt und miteinander verschaltet werden. In jeder Systemkomponente werden zeitvariable Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie zeitkonstante Parameter definiert. Die Berechnung des instationären thermischen Verhaltens des Systems erfolgt über einen internen Gleichungslöser.

Gebäudemodell Type56

Das energetische Verhalten von Gebäuden kann mit TRNSYS 17 über ein Multizonen-Gebäudemodell [TRNbuild 2005] analysiert werden. Das Simulationsobjekt wird dazu je nach gewünschtem Detaillierungsgrad in Zonen mit unterschiedlicher Nutzung unterteilt. Zur einfachen Flächenaufnahme kann ein dreidimensionales Modell erstellt werden, das sowohl die geometrischen als auch die bauteilbezogenen Informationen aller Zonenumfassungsflächen enthält [TRNSYS3D 2012]. Als Beispiel ist in Abb. 65 die Zonierung des Demonstrationsgebäudes mit TRNSYS3D zu sehen.

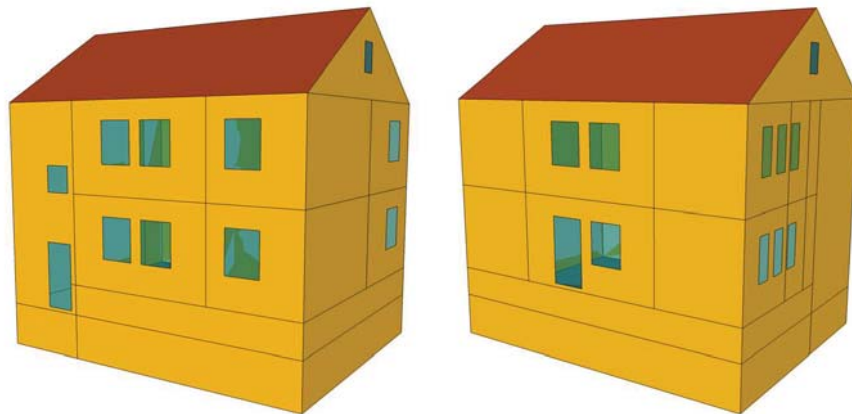


Abb. 65: Südwestansicht (links) und Nordostansicht (rechts) des zonierten Demonstrationsgebäudes in TRNSYS3D

Jede Zone wird über einen Luftknoten vereinfacht und stellt einen eigenen Bilanzrahmen dar, der durch die wärmeumschließende Hüllfläche begrenzt wird. Die Wärmebilanz der Zone wird für jeden Zeitschritt der Simulation neu errechnet. Die Bilanz setzt sich aus verschiedenen Wärmequellen und -senken zusammen.

¹⁷ TRNSYS: Transient System Simulation Programm siehe auch: www.trnsys.com

- Transmissionswärmequellen und -senken über die raumabschließenden Hüllflächen durch Wärmeleitung und den konvektiven Wärmeübergang zwischen Raumluft und der Bauteiloberfläche
- Lüftungswärmequellen und -senken über Infiltration, also dem Luftaustausch zwischen Raumluft und Außenluft, sowie über Ventilation durch einen definierten Luftvolumenstrom beispielsweise einer raumluftechnischen Anlage
- Wärmeaustausch zwischen zwei thermischen Zonen, der sich aufgrund von Luftströmungen zwischen den Räumen einstellt
- Solare Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung auf transparente Bauteile, wie beispielsweise Fenster
- Interne Wärmequellen aufgrund der Wärmeabgabe von Personen, durch künstliche Beleuchtung und den Betrieb von technischen Geräten

Die Regelstrategie für Beheizung, Kühlung, Belüftung und Beleuchtung kann für jede thermische Zone individuell festgelegt werden.

Luftströmungsmodell TRNflow

Die Festlegung der Luftvolumenströme und Infiltrationsraten der thermischen Zonen des zuvor beschriebenen Mehrzonen-Gebäudemodells werden als externe Eingabe vom Nutzer vorgenommen. Die realen Luftwechsel, die sich in den einzelnen Räumen aufgrund der anliegenden Temperatur- und Druckgradienten einstellen, werden daher nicht automatisch berücksichtigt. Eine genauere Berechnung der Luftströme kann durch eine gekoppelte Simulation zwischen dem thermischen Gebäudemodell und einem Luftströmungsmodell erzielt werden. Das Luftströmungsmodell TRNflow bildet das Gebäude mit allen Zonen idealisiert als ein geschlossenes Netzwerk aus Luftberechnungsknoten ab, die über Strömungsdurchlässe miteinander verknüpft sind. Die treibenden Kräfte für die Berechnung des Strömungsnetzwerks sind zum einen die Windlasten, die über die Strömungswiderstandskoeffizienten und das vorliegende Windgeschwindigkeitsprofil am Standort charakterisiert werden, und zum anderen der thermische Auftrieb, der durch Druck- und Temperaturunterschiede hervorgerufen wird. Der Luftaustausch zwischen den einzelnen thermischen Zonen des Gebäudes und der Außenluft findet über Strömungsdurchlässe statt. Dies können Leckagen in der Gebäudehülle sein, aber auch Fenster und Türen oder Komponenten des Lüftungssystems, wie Luftkanäle oder Ventilatoren. Das Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Massenstroms in jeder Zone führt auf ein nichtlineares Gleichungssystem, das iterativ gelöst werden kann und die Drücke in allen Knoten ausgibt. Aus den resultierenden Drücken erhält man dann den Massenstrom zwischen den Berechnungsknoten und weitere Größen wie die Luftwechselrate oder die Infiltrations- und Exfiltrationsraten der Räume.

Rohrmodell Type 31

Die Wärmeverluste, die sich durch die fassadenintegrierte Luftkanalführung einstellen, können mithilfe des Luftknotenmodells nicht berechnet werden. Dazu wird ein Modell der dämmstoffintegrierten Luftkanäle benötigt, welches die Wärmeübertragungsvorgänge zwischen der strömenden Luft und der Umgebung möglichst genau abbildet. In TRNSYS kann die Energiebilanz eines durchströmten Rohres mit einem Durchflussmodell beschrieben werden [TRNSYS 2012]. Als Eingangsgrößen der Berechnung müssen der Massenstrom, die Eingangstemperatur sowie die Eigenschaften des Mediums (Rohdichte und Wärmekapazität) und die Umgebungstemperatur bekannt sein. Der durchströmte Kanal mit kreisrundem Querschnitt wird über den Durchmesser, die Kanallänge und den Wärmedurchgangskoeffizienten charakterisiert. Das Durchflussmodell unterteilt das Fluid, das sich während jedem Zeitschritt im Kanal befindet, in verschieden große Segmente. Zwischen den Elementen tritt dabei keine Durchmischung oder Wärmeleitung auf. Zu jedem Zeitschritt strömt eine neue Fluidmenge in das Rohr und verdrängt weitere Elemente im Kanal nach hinten. Am Austritt aus dem Kanal werden die Teilsegmente wieder vermischt und aus der massegewichteten Temperatur der Einzel-elemente kann die Austrittstemperatur des Mediums bestimmt werden. Die Wärmeverluste an die Umgebung, die sich über die Verweildauer der Elemente im Rohr ergibt, können als Ausgabewert dem Modell entnommen werden.

5.3 Simulationsrandbedingungen

Die für die Simulation des Demonstrationsgebäudes und des dort verbauten Lüftungssystems zugrunde gelegten Randbedingungen werden in diesem Abschnitt beschrieben. Diese betreffen sowohl die Materialkenndaten und Bauteilaufbauten des Gebäudes, die verwendeten Klimadatensätze sowie die Nutzungsrandbedingungen zur Beheizung der Räume, die Berücksichtigung interner Wärmelasten und die Ansätze zur Erfassung der Infiltrationsraten und der geforderten mechanischen Luftwechsel. Die Modelle zur Berechnung der Wärmeverluste über die fassadenintegrierte Luftkanalführung und das Luftknotenmodell werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

5.3.1 Bauteilaufbauten

Eine Kurzbeschreibung des zu untersuchenden Demonstrationsgebäudes ist bereits in Kapitel 3.2 zu finden. Die Materialkenndaten des Gebäudes sind, soweit bekannt, den vorliegenden Plänen entnommen oder werden durch wärmeschutztechnische Bemessungswerte nach [DIN 4108-4] und Angaben nach [Ornth 2009] ergänzt. Weitere fehlende Daten zur Kennzeichnung des Wärmeschutzstandards im Ausgangszustand des Gebäudes liefert die Hessische Gebäudetypologie [Born et al. 2011] durch Kenndaten typischer Baukonstruktionen (EFH Baujahr 1919-1948). Die für die Simulation verwendeten Bauteilaufbauten sind in nachstehender Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Bauteilaufbauten des Demonstrationsgebäudes im Ausgangszustand (BAK 1919-1948)

Bauteil	Material	d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m³]	c [J/(kgK)]
Außenwand U=1,72 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Vollziegel	0,3	0,81	1800	900
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Innenwand 110 U=2,87 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Vollziegel	0,11	0,81	1800	900
	Kalkgipsputz	0,015	0,70	1400	1000
Innenwand 160 U=2,44 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Vollziegel	0,16	0,81	1800	900
	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
Innenwand 300 U=1,72 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Vollziegel	0,3	0,81	1800	900
	Kalkzementputz	0,015	0,7	1400	960
Kellerdecke U=1,47 W/(mK)	Zementestrich	0,04	1,4	2000	1000
	Trittschalldämmung	0,015	0,04	20	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
Kehlbalkenlage U=0,8 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Holzbalken	0,025	0,18	700	1600
	Lehmschlag	0,14	0,3	790	1000
	Dielung	0,025	0,18	700	1600
Fenster U _w =2,8 W/(mK)	2-Scheiben- Isolierverglasung				

Die Bauteilaufbauten nach der energetischen Sanierung des Gebäudes mit einem Wärmedämmverbund-System und einer Aufsparrendämmung des Daches sind in Tab. 3 enthalten. Grundlage für die Bemessung der wärmetechnischen Maßnahmen ist die zum Zeitpunkt der Sanierung gültige Fassung der Energieeinsparverordnung aus dem Jahre 2009 [EnEV 2009].

Tab. 3: Bauteilaufbauten des Demonstrationsgebäudes im sanierten Zustand gemäß [EnEV 2009]

Bauteil	Material	d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m³]	c [J/(kgK)]
Außenwand U=0,17 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Vollziegel	0,3	0,81	1800	900
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
	EPS WLS 032	0,16	0,032	25	1250
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	1000
Dach U=0,1 W/(mK)	Holz	0,025	0,18	700	1600
	EPS WLS 032	0,16	0,032	25	1250
	Holz	0,025	0,18	700	1600
	EPS WLS 032	0,16	0,032	25	1250
	Ziegeleindeckung				

5.3.2 Klimarandbedingungen

Der Einfluss der äußeren klimatischen Bedingungen bei instationären thermischen Simulationen von Gebäuden wird durch die Verwendung von standortbezogenen Wetterdaten in Ansatz gebracht. Da in unmittelbarer Nähe des Demonstrationsgebäudes in Kassel keine meteorologischen Daten erfasst werden, wird zur simulationstechnischen Abbildung auf die Klimadatenätze des Deutschen Wetterdienstes (DWD)¹⁸, die sogenannten Testreferenzjahre (TRY), zurückgegriffen. Das Gebiet der Bundesrepublik wird dabei in 15 repräsentative Regionen unterteilt und die Datensätze enthalten jeweils alle wichtigen meteorologischen Parameter in stündlichen Werten für einen repräsentativen Jahresverlauf. In der für die Simulation zugrunde liegenden Fassung der TRYs aus dem Jahre 2011 entspricht dies dem Beurteilungszeitraum von 1988 bis 2007 [BBR 2011]. Für alle Berechnungen am Demonstrationsgebäude in Kassel wird der Klimadatenatz der TRY-Region 07 (nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche) verwendet. Abb. 66 zeigt beispielhaft die monatliche Durchschnittstemperatur, sowie die Monatssummen der Global-, Diffus- und Direktstrahlung für den Standort Kassel.

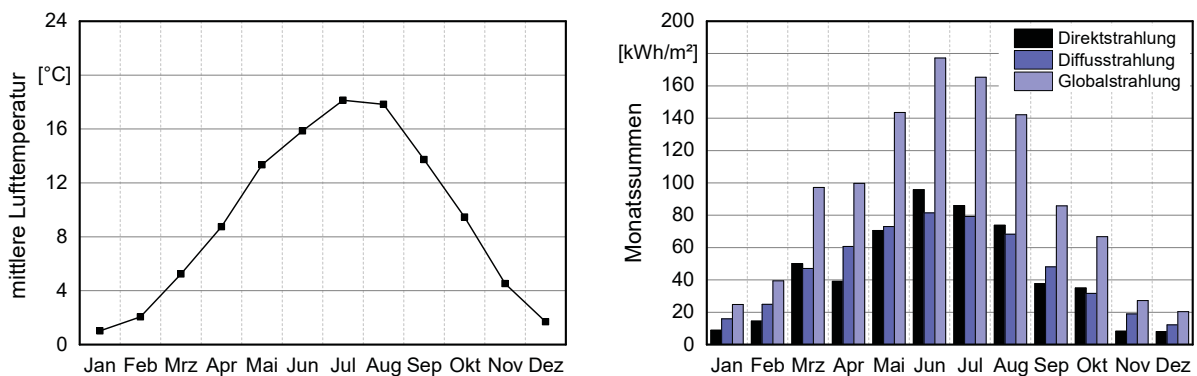


Abb. 66: Mittlere Lufttemperatur und Monatssummen der Global-, Diffus- und Direktstrahlung für die Klimadatenätze des TRY-Region 7 2011

Als Eingangsgrößen für die Simulation werden im Wesentlichen die nachfolgenden Klimaparameter als Stundenmittelwerte benötigt, aus denen alle weiteren Größen wie beispielsweise die Einstrahlung auf vertikale und geneigte Fenster-, Dach- und Außenwandflächen errechnet werden können.

- Direkte Sonnenbestrahlungsstärke bezogen auf die horizontale Fläche in [W/m²]
- Diffuse Sonnenbestrahlungsstärke bezogen auf die horizontale Fläche in [W/m²]
- Lufttemperatur in [°C]
- Relative Feuchte in [%]
- Luftdruck in [Pa]
- Windgeschwindigkeit in [m/s]
- Windrichtung in [°]

¹⁸ DWD: Deutscher Wetterdienst siehe auch: <http://www.dwd.de/TRY>

5.3.3 Nutzungsrandbedingungen

Die Annahmen zur Abbildung des Nutzerverhaltens können einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmequellen und –senken, die thermischen und energetischen Eigenschaften eines Gebäudes und die Bestimmung des jährlichen Heizwärmebedarfs haben. In diesem Abschnitt wird auf die zugrunde gelegten Annahmen hinsichtlich der Nutzung, der angesetzten Infiltrationsraten und Luftwechsel, der internen Wärmelasten und die Regelstrategien für die Beheizung des Gebäudes eingegangen. Im Wesentlichen werden hierbei die Nutzungsrandbedingungen für die Berechnung des Energiebedarfs von Wohngebäuden nach [DIN V 18599-2] angewendet.

Zonierung des Gebäudes

Das zu untersuchende Zweifamilienhaus wird in unterschiedliche Gebäudezonen unterteilt. Jeder Raum wird dabei als eine eigene thermische Zone definiert. Dieser hohe Detaillierungsgrad ist notwendig, um die strömungstechnische Luftverteilung und die Luftvolumenströme in allen Zonen mit dem Luftströmungsmodell berechnen zu können. Basis für die Zonierung des Gebäudes ist die Erstellung eines 3D-Gebäudemodells zur einfachen Flächenaufnahme und weiteren Verarbeitung in TRNSYS. Der Dachboden, das Treppenhaus und das Kellergeschoss sind unbeheizt und werden ebenfalls als eigene Gebäudezone modelliert. Die Zonen des Gebäudes mit ihren Abmaßen sind in Tab. A 7 im Anhang dargestellt.

Infiltration und mechanische Lüftung

Im Ausgangszustand wird das Gebäude über Fenster und Türen natürlich belüftet. Der gesamte anzusetzende Luftwechsel setzt sich dabei aus dem Infiltrations- und dem Fensterluftwechsel zusammen. Unter Infiltration versteht man den Luftwechsel, der sich aufgrund der anliegenden Temperatur- und Druckgradienten über Undichtigkeiten in der wärmeumschließenden Hüllfläche einstellt. Nach [DIN V 18599-2] kann dieser über den n_{50} -Bemessungswert der Gebäudedichtheitsklasse (entspricht in diesem Fall einem Wert von $n_{50}=6 \text{ h}^{-1}$) und dem Windschutzkoeffizienten $e=0,07$ ermittelt werden.

$$n_{inf} = n_{50} \cdot e_{wind} \quad (5.1)$$

Der Fensterluftwechsel n_{win} kann wie folgt bestimmt werden:

$$n_{win} = 0,1 \text{ h}^{-1} + \Delta n_{win} \cdot \frac{t_{nutz}}{24} \quad (5.2)$$

Die Nutzungszeit wird nach DIN V 18599 für Wohngebäude mit 24 h pro Tag und der nutzungsbedingte Mindestaußenluftwechsel mit $n_{nutz}=0,5 \text{ h}^{-1}$ angesetzt.

$$\Delta n_{win} = n_{nutz} - (n_{nutz} - 0,2 \text{ h}^{-1}) \cdot n_{inf} - 0,1 \text{ h}^{-1} \quad (5.3)$$

Nach der energetischen Sanierung und der Installation der mechanischen Lüftungsanlage reduziert sich die Infiltration durch die von der Lüftungsanlage hervorgerufene Druckdifferenz. Der reduzierte Infiltrationsluftwechsel kann nach Formel (5.4) berechnet werden. Hierbei geht der Faktor ($f_{ATD}=1$) für eventuell vorhandene Außenluftdurchlässe und der Faktor ($f_e=1$) zur Bewertung von ausbalancierten Luftmengen sowie die Nutzungszeit ($t_{v,mech}=24\text{h}$) der mechanischen Lüftungsanlage ein. Werden die Anforderungen an die Gebäudedichtheit nach DIN 4108-7 erfüllt, reduziert sich der n_{50} -Bemessungswert auf $n_{50}=2 \text{ h}^{-1}$.

$$n_{inf} = n_{50} \cdot e_{wind} \cdot f_{ATD} \cdot \left(1 + (f_e - 1) \frac{t_{V,mech}}{24h}\right) \quad (5.4)$$

Der Fensterluftwechsel bei Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage kann nach [DIN 18599-2] unter Berücksichtigung einer Grundlüftung von $0,1 \text{ h}^{-1}$, einer Nutzungszeit von 24 h pro Tag und einem zusätzlichen Fensterluftwechsel $\Delta n_{win,mech}=0 \text{ h}^{-1}$ mit nachstehender Formel ermittelt werden.

$$n_{win} = 0,1 \text{ h}^{-1} + \Delta n_{win,mech} \cdot \frac{t_{nutz}}{24} \quad (5.5)$$

In Tab. 4 sind die für die dynamischen Simulationen am Demonstrationsgebäude angesetzten Luftwechsel für die Varianten mit und ohne Lüftungsanlage aufgetragen. Diese normativ ermittelten Luftwechselzahlen werden nur dann eingesetzt, wenn das Luftströmungsmodell TRNflow nicht zum Einsatz kommt. Bei Simulation mit dem Luftströmungsmodell TRNflow werden die untenstehenden Ansätze nicht verwendet, sondern der Luftaustausch zwischen den Zonen intern über den integrierten Gleichungslöser berechnet.

Tab. 4: Normativ ermittelter Luftwechsel für die dynamischen Simulationen gemäß [DIN V 18599-2]

Demonstrationsgebäude Baujahr 1920	Luftwechsel [h^{-1}]		
	Infiltration	Fenster	Mech. Luftwechsel
Ausgangszustand vor der energetischen Sanierung (ohne Lüftungsanlage)	0,42	0,37	-
Sanierter Zustand (mit Lüftungsanlage)	0,14	0,1	0,45

Die Dimensionierung der erforderlichen Volumenströme nach Nennlüftung für die einzelnen Räume bei Installation der mechanischen Zu- und Abluftanlage erfolgt nach DIN 1946-6. Die Luftmengen sind im Anhang in Tab. A 5 dargestellt. Der daraus resultierende mechanische Gebäudeluftwechsel beträgt $n=0,45 \text{ h}^{-1}$ und entspricht in diesem Fall dem nutzungsbedingtem Mindestaußenluftwechsel nach [DIN V 18599-10].

Interne Wärmequellen

Interne Wärmequellen im Gebäude, wie die Wärmeabgabe der Personen, durch Beleuchtung und den Betrieb elektrischer Geräte werden durch konstante Werte in Ansatz gebracht. Für die spätere Berechnung mit stündlichen Simulationszeitschritten werden die täglichen spezifischen Wärmeeinträge für alle Zonen in spezifische Wärmeleistungswerte umgerechnet. Tab. 5 zeigt die gewählten Randbedingungen nach [DIN V 18599-10] getrennt für Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Tab. 5: Interne Wärmelasten für Ein- und Mehrfamilienhäuser nach DIN V 18599-2

Gebäude	Interne Wärmequellen [Wh/m ² d]	Interne Wärmequellen [W/m ²]
Einfamilienhaus (EFH)	45	1,875
Mehrfamilienhaus (MFH)	90	3,75

Beheizung

Die Art der Beheizung und die angesetzten Raumtemperaturen während der Heizperiode sind entscheidend für die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs des Gebäudes. Als Vergleichsgröße zur Quantifizierung der Energieeinsparung durch die baulichen Sanierungsmaßnahmen und durch das Lüftungssystem wird der Heizwärmebedarf gewählt. Da keine Änderungen am Heizungssystem durchgeführt werden, erhält man mit dem Heizwärmebedarf eine Beurteilungsgröße, die unabhängig vom gewählten Heizungssystem ist. Die Beheizung der Räume erfolgt daher in der Simulation über eine ideale Heizung, das heißt, es treten keine Anlagenverluste bei der Wärmeübergabe, -verteilung und -speicherung auf. Die Wohnräume des Gebäudes in beiden Geschossen werden während der täglichen Betriebszeit von 6.00 Uhr bis 23.00 Uhr auf 20°C beheizt und nachts zwischen 23.00 Uhr und 6.00 Uhr auf 18°C abgesenkt. Das Treppenhaus, das Kellergeschoss und der Dachboden werden nicht temperiert.

5.4 Voruntersuchungen

Die in der Fassade verlegten dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle wirken sich aufgrund ihrer thermischen und hydraulischen Eigenschaften auf das Gebäude und die Effizienz des Lüftungssystems aus. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wird der Ansatz verfolgt, die physikalischen Vorgänge im Luftkanalnetz möglichst detailliert und genau abzubilden. Mithilfe der Modellierung der fassadenintegrierten Luftkanalführung können die wichtigsten energetischen Kenngrößen, wie die Wärmeverluste über die Kanalführung und der gesamtenergetische Wirkungsgrad des Lüftungssystems, bestimmt werden. Des Weiteren kann durch die Identifizierung der wichtigsten Einflussparameter auf das thermische und hydraulische Verhalten des Lüftungssystems eine Optimierung des Gesamtsystems erreicht werden. Das Gebäude und das Lüftungssystem werden gemeinsam über eine gekoppelte dynamische Berechnung in der Simulationsumgebung TRNSYS analysiert und bewertet. Die dafür benötigten physikalischen Modellansätze werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Zunächst wird ein statischer Ansatz gewählt, der es erlaubt, den Einfluss der Luftkanalführung auf den Wärmedurchgang der Außenwand zu beschreiben. Die Wirkung der Kanäle auf die Wärmetransmission wird im Anschluss daran in ein instationäres Modell überführt, das in das Gesamtmodell implementiert wird.

5.4.1 Modellierung der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung

Statischer Wärmebrückenansatz

In einer ersten Näherung wird die Luftkanalführung innerhalb der Wärmedämmschicht der Außenwand als eine Wärmequelle bzw. -senke innerhalb des Außenwandquerschnitts betrachtet. In Abhängigkeit der Kanaltemperatur führen die im Dämmstoff vorhandenen Luftkanäle zu einem höheren oder niedrigeren Wärmefluss im Bereich des Außenwandquerschnitts. Diese lokale Änderung des Wärmedurchgangs wird als Wärmebrücke bezeichnet. Die Differenz aus dem gesamten Wärmestrom Φ bezogen auf die vorliegende Temperaturdifferenz und dem Wärmeverlust des Regelquerschnitts der Wand ergibt den zusätzlichen temperaturspezifischen Wärmeverlust ΔH [Häupl et al. 2013] nach Gleichung (5.6).

$$\Delta H = \frac{\Phi}{\Delta\theta} - U \cdot A \quad (5.6)$$

Ersetzt man die Bauteilfläche durch die Kantenlänge a und normiert sie auf eine Breite von $b=1$, erhält man, wie auch in Kapitel 3.4.4 dargestellt, den längenspezifischen Wärmebrückenkoeffizienten ψ :

$$\Psi = \frac{H}{a} - U \cdot a \quad (5.7)$$

Zur Beschreibung des anliegenden Temperaturpotentials zwischen der Kanalluft und der Außenluft beziehungsweise der Raum- und Außenluft wird in Anlehnung an [DIN EN ISO 10211] der dimensionslose Temperaturfaktor f verwendet. Dieser kann wie folgt berechnet werden:

$$f = \frac{\theta_k - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (5.8)$$

In Abb. 67 ist ein Horizontalschnitt des Außenwandaufbaus mit integriertem Lüftungskanal dargestellt. Die Kantenlänge des betrachteten Außenwandbauteils beträgt $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, der Lüftungskanal weist einen Querschnitt von $30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ auf und liegt in einer Tiefe von 100 mm im Dämmstoffquerschnitt. Die Materialkennwerte der Bauteilaufbauten werden entsprechend Tab. 3 gewählt und die Temperaturrandbedingungen sind auf feste Zahlenwerte normiert, um das anliegende Temperaturpotential über den dimensionslosen Temperaturfaktor zu beschreiben. Die Raumluft erhält dabei den Wert 1 und die Außenluft den Wert 0. Die Kanallufttemperatur wird für die Berechnung des Wärmestroms durch das Bauteil in $0,1$ -Schritten zwischen 0 und 1 variiert. Betrachtet man die beiden Grenzwerte, erhält man dabei folgenden Zusammenhang:

$$\text{für } \theta_k = \theta_e \rightarrow f = 0 \quad (5.9)$$

$$\text{für } \theta_k = \theta_i \rightarrow f = 1 \quad (5.10)$$

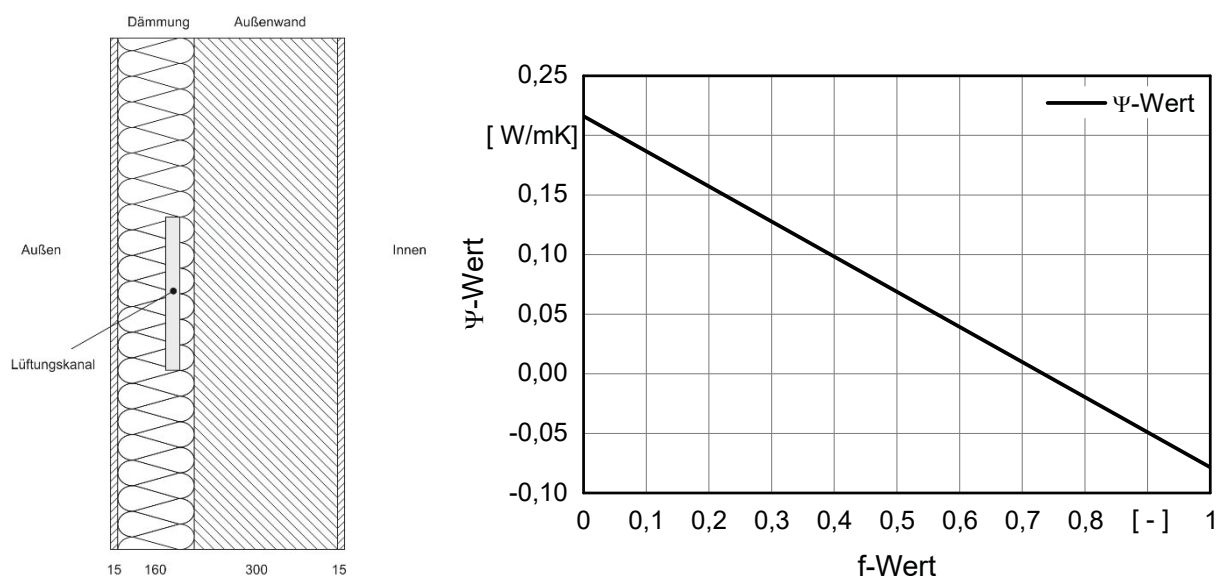


Abb. 67: Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ des Lüftungskanals in der Außenwand in Abhängigkeit des Temperaturfaktors f der Kanalluft, siehe auch [Hauser und Kaiser 2013]

Der Wärmefluss durch das Bauteil kann nun mithilfe der Finite-Differenzen-Methode in Abhängigkeit des gewählten dimensionslosen Temperaturfaktors f ermittelt werden. Die statischen Berechnungen werden mit dem Programm HEAT 3¹⁹ durchgeführt. Der Graph in Abb. 67 enthält die berechneten Wärmebrückenverlustkoeffizienten für den Lüftungskanal in der Außenwand in Abhängigkeit des Temperaturfaktors der Kanalluft. Hier ist zu erkennen, dass der ψ -Wert mit steigendem Temperaturfaktor f absinkt. Ab einem Temperaturfaktor von etwa 0,74 sind die Wärmebrückenverlustkoeffizienten negativ.

Betrachtet man einen Abluftkanal, so erhält man einen Temperaturfaktor am raumseitigen Einlass in den Kanal von knapp unter 1, was entsprechend Abb. 67 zu einem negativen ψ -Wert führt. In Strömungsrichtung kühlt die Kanalluft ab und nähert sich der Schichttemperatur im ungestörten Bauteilquerschnitt auf Höhe des Kanals. Im Falle eines sehr langen Abluftkanals erhält man als Grenzwert für die innere Kanaloberflächentemperatur gemäß der gewählten Kanalgeometrie und Lage einen f -Wert von 0,75 und für die äußere Kanaloberfläche einen Temperaturfaktor von 0,57 (siehe auch Abb. A 18 im Anhang). Dies bedeutet, dass in der Praxis ψ -Werte im Bereich zwischen 0 W/(mK) und 0,05 W/(mK) auftreten können. Die in Kapitel 3.4.4 messtechnisch am Demonstrationsgebäude bestimmten Wärmebrückenverlustkoeffizienten liegen je nach eingestelltem Volumenstrom zwischen 0,011 W/(mK) und 0,05 W/(mK) und bestätigen den hier gewählten Modellansatz.

Mit dem statischen Wärmebrückenansatz lassen sich die zusätzlichen Wärmeverluste der Außenwand mit integriertem Lüftungskanal mithilfe einer Berechnung des Gesamtenergiebedarfs beispielsweise mit standardisierten Randbedingungen nach DIN V 18599 bestimmen. Allerdings kann das statische Modell der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle keine Aussagen über den örtlich aufgelösten Verlauf der Kanallufttemperatur liefern. Auch das instationäre Verhalten bei schwankenden Luftgeschwindigkeiten und Temperaturrendbedingungen kann mit dem statischen Modell nicht untersucht werden. Möglichkeiten dafür liefern numerische Berechnungsprogramme zur gekoppelten Analyse der Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgänge (CFD-Simulation²⁰). Für die Zielstellung dieser Arbeit steht der Aufwand einer CFD-Simulation aber nicht im Verhältnis zu dem zu erwartenden Mehrgewinn.

Instationäre Berechnung mithilfe eines Durchflussmodells

Zur Abbildung instationärer thermischer und energetischer Vorgänge im Bereich der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle wird im Folgenden ein neuer dynamischer Modellansatz definiert, der in das Simulationsmodell von TRNSYS integriert wird. Die durch den Dämmstoff strömende Luft steht über den Kanalumfang mit ihrer Umgebung im Wärmeaustausch. Die im Außenwandbauteil auftretende Temperaturverteilung schwankt je nach anliegender Außen- und Innenraumtemperatur. Bei Bauteilschichttemperaturen an der Stelle der jeweiligen Kanalwandung, die höher sind als die Lufttemperatur im Kanal, führt dies zu Wärmeeinträgen in den Kanal, und für Schichttemperaturen, die niedriger sind als die Kanalluft, kommt es zu

¹⁹ HEAT 3: Software für dreidimensionale Wärmebrückenberechnungen siehe auch:
<http://www.buildingphysics.de/heat3.html>

²⁰ CFD: (engl. Computational Fluid Dynamics), numerische Strömungsmechanik

Wärmeabflüssen. Der Wärmeaustausch zwischen der Kanalluft und der Kanalwandoberfläche wird durch den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c beschrieben.

In TRNSYS kann die Austrittstemperatur und der Wärmeverlust eines durchströmten Rohres in einem Durchflussmodell, der Systemkomponente Type 31, modelliert werden. Als Eingangsparameter müssen die Eintrittstemperatur, die anliegende Umgebungstemperatur, der Massenstrom der strömenden Luft sowie die geometrischen Abmessungen des Rohrs und der Wärmedurchgangskoeffizient bekannt sein. Abb. 68 gibt die prinzipiellen Zusammenhänge zur Berechnung des energetischen Verhaltens am Außenwandbauteil und im Durchflussmodell wieder.

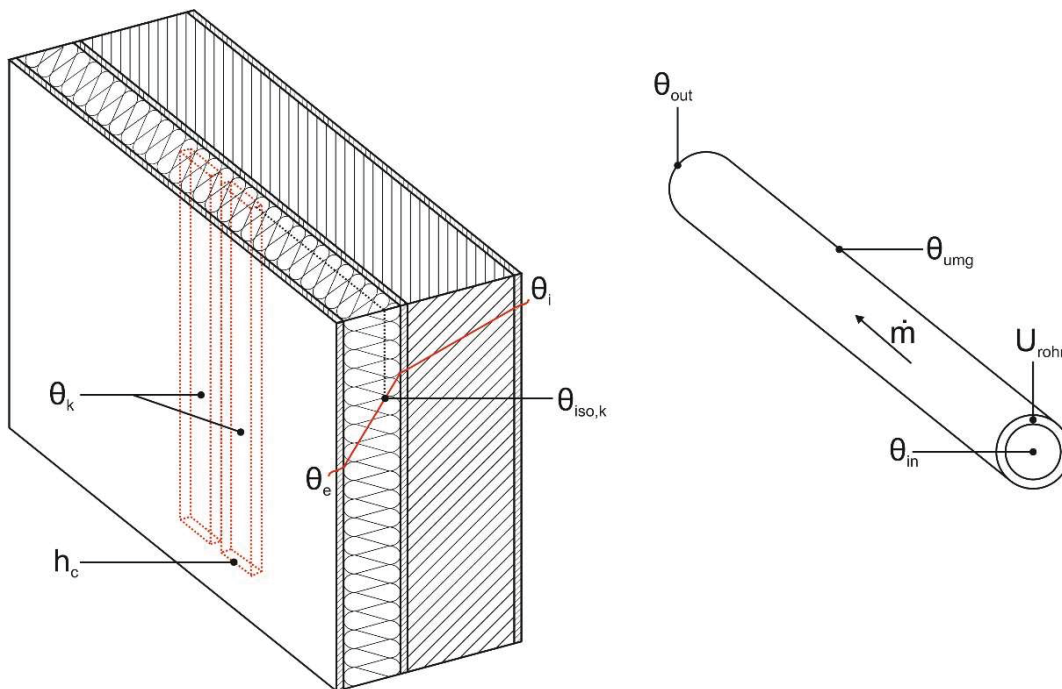


Abb. 68: Außenwandaufbau mit integriertem Lüftungskanal und Rohrmodell Type 31 in TRNSYS

Die Geometrie des realen Außenwandquerschnitts muss soweit vereinfacht und angepasst werden, dass die notwendigen Eingangsgrößen auf das Rohrmodell übertragen werden können. Dies gilt für folgende Größen:

- wärmeübertragender Kanalumfang
- anliegende Umgebungstemperatur
- Wärmedurchgangskoeffizient der Kanalwand

Der wärmeübertragende Kanalumfang des Luftkanals U_r mit den Kantenlängen a und b (hier 30 mm x 300 mm) wird auf einen kreisförmigen Querschnitt überführt.

$$U_r = 2(a + b) = \pi \cdot d \quad (5.11)$$

Durch Umformen erhält man den Durchmesser eines äquivalenten runden Rohres.

$$d = \frac{U_r}{\pi} \quad (5.12)$$

Die Umgebungstemperatur, die am durchströmten Kanal anliegt, entspricht in erster Näherung der Temperatur an entsprechender Schichttiefe im ungestörten Wandquerschnitt. Bei bekannter

Wärmestromdichte q und Teil-Wärmedurchlasswiderstand $R_{\text{teil,außen}}$ kann die gesuchte Schichttemperatur bestimmt werden.

$$\theta_{iso,k} = R_{\text{teil,außen}} \cdot q + \theta_e \quad (5.13)$$

mit dem Teilwiderstand:

$$R_{\text{teil,außen}} = R_{si} + \frac{d_{\text{Putz}}}{\lambda_{\text{Putz}}} + \frac{d_{\text{EPS,K}}}{\lambda_{\text{EPS}}} \quad (5.14)$$

Der Wärmedurchgangswiderstand (U-Wert) des modellhaft infinitesimal dünnen Rohrs entspricht im gewählten Modellansatz dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c zwischen der strömenden Kanalluft und der Kanalinnenoberfläche. Die Wärmestromdichte q wird nach Gleichung (5.15) bestimmt.

$$q = h_c \cdot (\theta_k - \theta_{umg}) \quad (5.15)$$

Grundlagen zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs in durchströmten Rohren sind ausführlich in der Literatur beschrieben. Ausgangspunkt ist immer die Ermittlung der dimensionslosen Nußelt-Zahl Nu . Bei einer ausgebildeten Strömung in zylindrischen Rohren bezieht sich das charakteristische Längenmaß nicht auf die Länge, sondern auf den hydraulischen Durchmesser des Rohres.

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} \quad (5.16)$$

Für erzwungene Konvektion erfolgt die Berechnung der Nußelt-Zahl zumeist über eine sogenannte Nußelt-Korrelation [Polifke und Kopitz 2011] und zwei thermofluidynamische Kennzahlen, der Reynolds-Zahl Re und der Prandl-Zahl Pr .

$$Nu = Nu(Re, Pr) \quad (5.17)$$

Diese beiden Ähnlichkeitszahlen können über den hydraulischen Durchmesser und die physikalischen Eigenschaften der strömenden Luft, der kinematischen Viskosität ν und der Temperaturleitfähigkeit a ermittelt werden.

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} \quad (5.18)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5.19)$$

Für durchströmte Rohre kann die lokale Nußelt-Zahl an jeder beliebigen Stelle im Rohr bestimmt werden. Speziell an der Einlaufstelle des Rohres, wo sich neben dem Geschwindigkeitsprofil infolge der Rohrreibung auch ein Temperaturprofil durch den Wärmeaustausch entwickelt, spielt die Ausbildung der Grenzschichten eine entscheidende Rolle für die Ermittlung der Nußelt-Zahl [VDI 2006]. Zur Vereinfachung werden deshalb für alle Strömungsformen die Berechnungsgleichungen zur Bestimmung der mittleren Nußelt-Zahlen in zylindrischen Rohren nach [VDI 2006] verwendet. Bei ausgebildeter laminarer Rohrströmung für Reynolds-Zahlen bis etwa 2.300 unterscheidet man die beiden Fälle „konstante Wandtemperatur“ und „konstante Wärmestromdichte“. Die mittlere Nußelt-Zahl bei laminarer Strömung und konstanter Wandtemperatur ergibt sich nach [VDI 2006] zu:

$$Nu_{m,lam,\vartheta} = \left[3,66^3 + 0,7^3 + \left[1,615 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{l_r} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,7 \right]^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.20)$$

Im Falle einer konstanten Wärmestromdichte lautet die Näherungsgleichung gemäß [VDI 2006]:

$$Nu_{m,lam,q} = \left[4,364^3 + 0,6^3 + \left[1,953 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{l_r} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,6 \right]^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.21)$$

Die mittlere Nußelt-Zahl bei voll ausgebildeter turbulenter Rohrströmung ($Re \geq 10^4$) unterscheidet sich bei den Randbedingungen einer konstanten Wandtemperatur und einer konstanten Wärmestromdichte kaum. Die mittlere Nußelt-Zahl wird wie folgt angegeben:

$$Nu_{m,turb} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_h}{l_r} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (5.22)$$

mit dem Reibungsbeiwert:

$$\xi = (1,8 \cdot \log_{10}(Re) - 1,5)^{-2} \quad (5.23)$$

Die Nußelt-Zahlen für den Übergangsbereich ($2300 < Re < 10^4$) können über eine Interpolationsgleichung gemäß [Böckh und Wetzel 2011] ermittelt werden. Dabei wird die Nußelt-Zahl im laminaren Bereich bei einer Reynold-Zahl von $Re=2.300$ nach Formel (5.20) bzw. (5.21) und die Nußelt-Zahl im turbulenten Bereich für $Re=10^4$ nach Formel (5.22) benötigt.

$$Nu_m = (1 - \gamma) \cdot Nu_{m,lam,2300} + \gamma \cdot Nu_{m,turb,10^4} \quad (5.24)$$

und dem Intermittenzfaktor:

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} \quad (5.25)$$

Am Demonstrationsgebäude weisen die vertikalen dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle zur Erschließung der einzelnen Räume jeweils den gleichen Lüftungsquerschnitt auf. Die benötigten Volumenströme in den Wohnräumen unterscheiden sich jedoch, sodass die Luftgeschwindigkeit in den Teilkanälen teils stark voneinander abweichen. Im Sockelbereich des Gebäudes ist, getrennt für die Zuluft und Abluft, ein Verteil- bzw. Sammelkanal mit einem freien Querschnitt von 100 mm x 200 mm angeordnet. Auch hier ändern sich die Luftmengen an Abzweigen und Zusammenführungen, wodurch es in den Kanälen zu unterschiedlich hohen Luftgeschwindigkeiten kommt. Zur Bestimmung der Strömungsform und des konvektiven Wärmeübergangs zwischen Kanalwandung und der strömenden Luft, aber vor allem zur Ermittlung des Temperaturprofils in Strömungsrichtung und damit der Wärmegewinne und Wärmeverluste der Luft ist die Luftgeschwindigkeit jedoch von zentraler Bedeutung. Demnach wird das Luftkanalnetz in Teilabschnitte mit entsprechend gleicher Rohrgeometrie und gleicher Strömungsgeschwindigkeit unterteilt. Die Aufteilung der Luftkanalführung und die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der einzelnen Kanalabschnitte geht aus Abb. A 19 und Tab. A 9 im Anhang hervor. Die Modellierung der Teilabschnitte des Kanalnetzes am

Zweifamilienhaus und die Berechnung der jeweiligen Eingangsparameter der Kanäle, wie dem wärmeübertragenden Umfang, der anliegenden Umgebungstemperatur und dem Wärmedurchgangskoeffizienten, erfolgen in der Simulationsumgebung TRNSYS. Die in den Teilkanälen angesetzten Volumenströme entsprechen zunächst den Luftmengen der Auslegungswerte nach [DIN 1946-6]. Zur Überprüfung der Temperaturentwicklung im Zuluft- und Abluftkanal des thermischen Modells werden reale Temperaturmessdaten am Demonstrationsgebäude als Eingangsgrößen für die Berechnung verwendet. So können die simulierten Austrittslufttemperaturen aus dem Kanalnetz den gemessenen Lufttemperaturen gegenübergestellt werden. Für den Vergleich zwischen Messdaten und dynamischer Simulation wird ein zweiwöchiger Messzeitraum im November 2010 verwendet. Innerhalb dieses Zeitabschnitts sind beide Wohneinheiten dauerhaft beheizt, sodass der Betrieb der Lüftungsanlage nicht durch den Frostschutz am Lüftungszentralgerät beeinträchtigt ist. Die Messensoren an den Raumein- und -auslässen befinden sich jeweils hinter dem Verbindungsrohr zwischen Raum und vertikalem Lüftungskanal. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Lufttemperaturen in den Ablufträumen geringfügig höher liegen als die gemessenen Temperaturen. In Abb. 69 sind die Verläufe der gemessenen Ablufttemperaturen innerhalb des zweiwöchigen Messzeitraums, die als Eingangsdaten für die Berechnung der Kanalaustrittstemperatur am Wärmeübertrager benötigt werden, dargestellt. Zu erkennen ist, dass alle Ablufträume innerhalb des Beobachtungszeitraums dauerhaft beheizt werden.

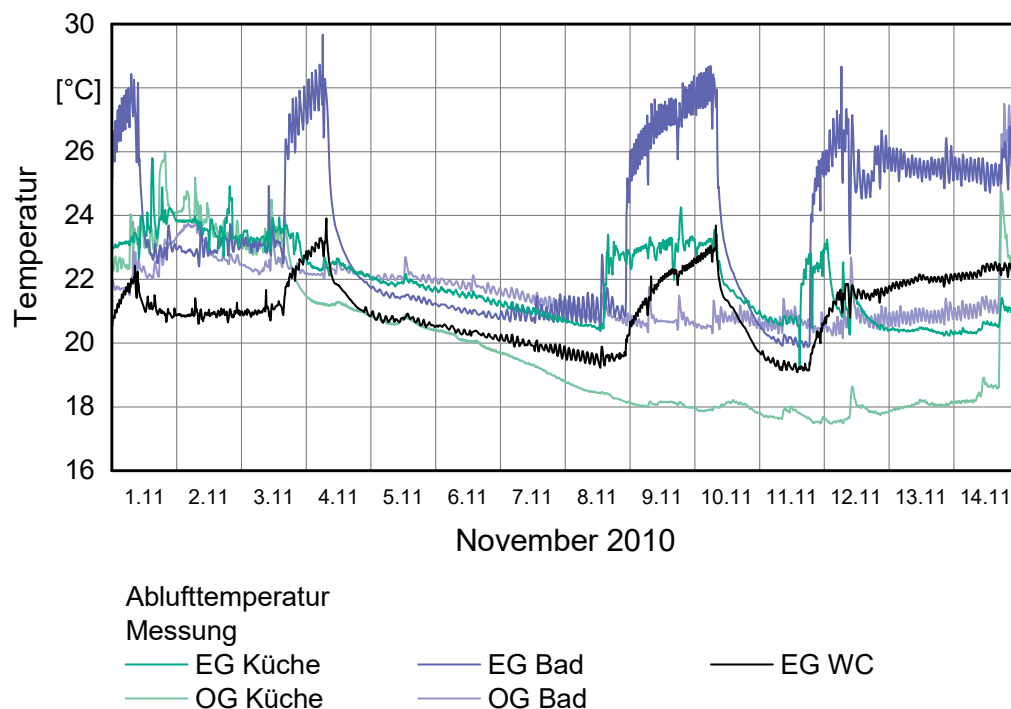


Abb. 69: Gemessene Ablufttemperaturen der Räume am Demonstrationsgebäude im November 2010

Für den Standort des Gebäudes in Kassel-Harleshausen liegen für den gewählten Messzeitraum keine Wetterdaten vor, dementsprechend wird die gemessene Außenlufttemperatur vor Eintritt in den Wärmetauscher als Randbedingung für die Bestimmung der Umgebungstemperatur des Durchflussmodells herangezogen. Die Temperaturverläufe der am Lüftungsgerät gemessenen Lufttemperaturen sind in Abb. 70 dargestellt. Die aus den Temperaturen resultierende Rückwärmehzahl innerhalb des betrachteten Zeitraums nach Gleichung (2.1) beträgt stets über 80 %.

berechnete und gemessene Lufttemperatur an der Abluftseite vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager, sind deutlich höhere Temperaturabweichungen zwischen Messung und Simulation festzustellen. Die über das thermische Durchflussmodell berechnete Ablufttemperatur liegt während des zweiwöchigen Beurteilungszeitraums mit einem Temperaturunterschied zwischen 0,5 K bis 2,5 K stets über den am Demonstrationsgebäude gemessenen Werten.

Der Temperaturverlauf in der Zuluftkanalführung kann mit dem dynamischen Durchflussmodellansatz ausreichend genau abgebildet werden. Die in der Simulation angesetzten Auslegungsvolumenströme und Teilluftmengen in den Kanalabschnitten, je nach Aufzweigung und Zusammenführung, können von den Luftströmen während der Messung am Gebäude abweichen und letztendlich zu den Temperaturunterschieden führen. Des Weiteren sind die Raumlufttemperaturen in den Wohnräumen innerhalb des Messzeitraums nicht bekannt, sodass die Berechnung der Bauteilschichttemperatur, die als Umgebungstemperatur der Teilkanäle eingesetzt wird, nicht exakt bestimmt werden kann. Die Berechnung der Ablufttemperatur am Wärmeübertrager führt über das thermische Modell zu höheren Werten als bei der Messung, sodass die Wärmeverluste durch die fassadenintegrierte Luftkanalführung möglicherweise zu gering angesetzt werden. Wie bereits in Kapitel 3.4.2 festgestellt wurde, deuten die Ergebnisse der Langzeitmessungen auf Leckagen in der Kanalführung hin, die auch für die geringeren Lufttemperaturen verantwortlich sein können. Durch den konstanten Unterdruck im Abluftkanal kann kalte Außenluft über Undichtigkeiten angesaugt werden, sodass die Kanallufttemperatur absinkt.

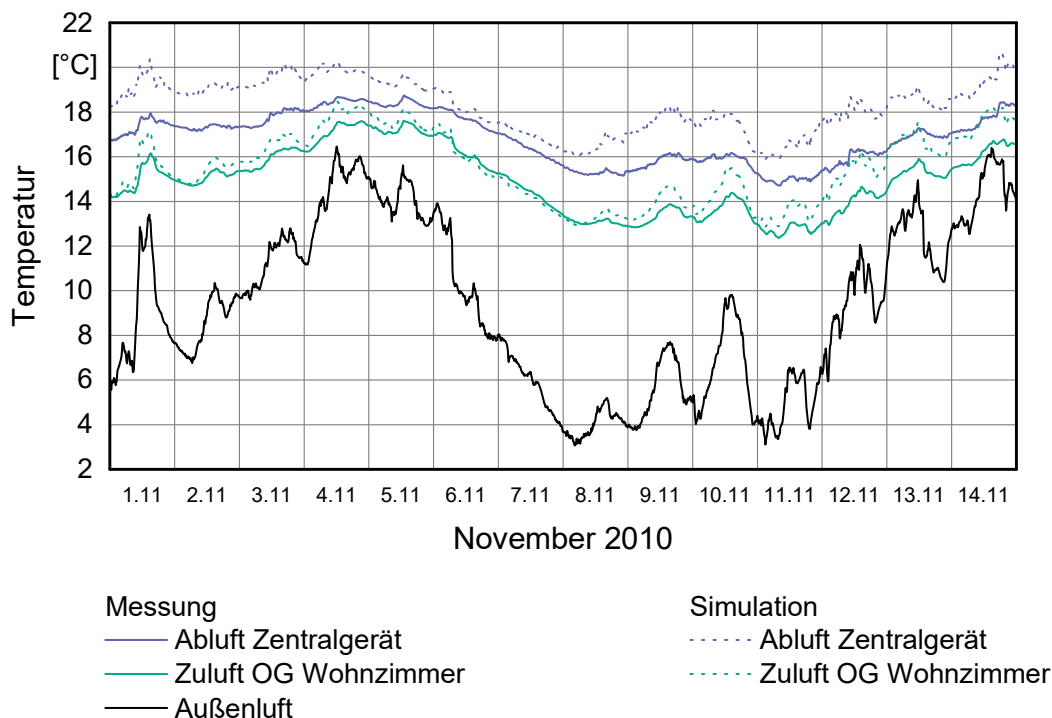


Abb. 71: Vergleich des gemessenen und simulierten Verlaufs der Zulufttemperatur im Wohnzimmer des OG und der Ablufttemperatur am Lüftungsgerät während des Messzeitraums im November 2010

5.4.2 Luftströmungssimulation mit TRNflow

Die Berechnung der hydraulischen Luftverteilung in den einzelnen Räumen des Demonstrationsgebäudes und des Luftkanalnetzes erfolgt mithilfe eines Luftknotenmodells in TRNflow. Das Gebäude und die fassadenintegrierte Luftkanalführung der Lüftungsanlage werden als ein geschlossenes Netzwerk aus Luftberechnungsknoten, die über Strömungsdurchlässe verbunden sind, idealisiert. In diesem Abschnitt werden die Eingangsparameter und Randbedingungen für die Berechnung der Volumenströme, die für die spätere Modellierung von Bedeutung sind, festgelegt und beschrieben.

Die Antriebskräfte zur Bestimmung der Drücke und Volumenströme für natürliche Lüftung sind der anliegende Winddruck und der thermische Auftrieb. Aus dem Klimadatensatz der TRY-Region 07 werden dazu die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung in jeweils 10 m Höhe sowie der Außenluftdruck benötigt. Für jede Fassadenorientierung wird ein Außenluftknoten definiert, dem für alle Himmelsrichtungen ein bestimmter Strömungswiderstandskoeffizient (auch Winddruckkoeffizient genannt) zugeordnet wird. Für kleine Gebäude mit bis zu drei Geschossen und einfacher Kubatur bei verschiedener Abschirmung in ländlicher und urbaner Umgebung können die Winddruckkoeffizienten aus [Orme et al. 1998] benutzt werden. In Tab. A 11 im Anhang sind die für die Berechnung am Demonstrationsgebäude verwendeten Winddruckkoeffizienten zusammengestellt.

Die Luftknoten der Innenräume sind über Strömungsdurchlässe mit der Außenluft, anderen Raumluftknoten und dem Kanalnetz verbunden. Dies können beispielsweise Fenster oder Türen, Luftspalte oder Undichtigkeiten in der Fassade oder Komponenten des Luftkanalnetzes sein. Der Druckabfall, der sich bei der Durchströmung einstellt, hängt von der Größe, der Geometrie und der Art der Strömung ab. Nach der baulichen Sanierung des Gebäudes mit einem Wärmedämmverbund-System werden keine Undichtigkeiten im Mauerwerk und der Außenwand angesetzt. Fenster und Türen wirken im geschlossenen Zustand wie ein Luftspalt und können über den Fugendurchlasskoeffizienten C charakterisiert werden. Der Massenstrom durch geschlossene Türen und Fenster berechnet sich bei bekanntem Druckunterschied zu:

$$\dot{m} = C \cdot \Delta p^n \quad (5.26)$$

Der Strömungsexponent n beschreibt, ob eine laminare oder turbulente Strömung vorliegt. Die Bestandsfenster und Türen am Demonstrationsgebäude wurden im Zuge der energetischen Sanierung nicht ausgetauscht, sodass Standardwerte für den Fugendurchlasskoeffizienten nach [TRNflow 2006] verwendet werden. Eine Übersicht der Eingabewerte ist in Tab. A 12 im Anhang zusammengestellt. Für geöffnete Fenster und Türen ist die anliegende Druckdifferenz zwischen zwei Luftknoten mit unterschiedlicher Luftdichte eine Funktion der Fensterhöhe. Es stellt sich somit ein vertikales Geschwindigkeitsprofil ein und es treten im Gegensatz zum Luftspalt Massenströme in beiden Durchströmungsrichtungen auf.

Die dämmstoffintegrierten Luftkanäle führen bei Durchströmung zu Reibungsdruckverlusten und dynamischen Verlusten an Einzelwiderständen gemäß den Gleichungen aus Kapitel 2.3.2. Die Rauigkeit der Luftkanäle wird entsprechend den Messergebnissen aus Kapitel 4.3 mit einem Wert von 0,15 angenommen und für die Druckverluste der Anschlussstücke werden die gemessenen Werte verwendet. Die Aufteilung der Kanäle und die Geometrie entsprechen den Abmaßen der

Teilabschnitte des thermischen Modells aus Abb. A 19 im Anhang. Die Teilkanäle sind über Hilfsluftknoten miteinander verbunden, denen die berechneten Austrittstemperaturen des Durchflussmodells zugewiesen werden. Die berechneten Luftvolumenströme in den Abschnitten des Zu- und Abluftkanalnetzes werden jeweils dem thermischen Modell übergeben. Die Ventilatoren im Zuluft- und Abluftkanalnetz sind die einzigen aktiven Elemente im Luftströmungsmodell, die zu einer Druckerhöhung in Strömungsrichtung führen. Dazu werden Wertepaare aus Druckdifferenz und Volumenstrom benötigt, die interpoliert die Ventilator Kennlinie ergeben. Das Kennlinienfeld für die baugleichen Zu- und Abluftventilatoren wird aus den in Tab. A 13 im Anhang enthaltenen Wertepaaren gebildet. Das Luftströmungsmodell in TRNflow mit allen Luftknoten und Strömungsdurchlässen ist in Abb. 72 dargestellt. Luftströmungen in Pfeilrichtung sind positiv und in entgegengesetzter Richtung negativ. Dies ist insbesondere bei geöffneten Türen und Außenfenstern wichtig, da hier je nach anliegenden Druckverhältnissen Massenströme in beide Richtungen auftreten können. Die Luftströmungssimulation liefert für alle thermischen Zonen die Ausgabe der Infiltrations- und Exfiltrationsraten, die Zuluft- und Abluftvolumenströme sowie die Massenströme zwischen den einzelnen Räumen. Für alle Strömungsdurchlässe können die Massenströme in beide Durchströmungsrichtungen und der Druckunterschied zwischen den beiden Luftknoten berechnet werden.

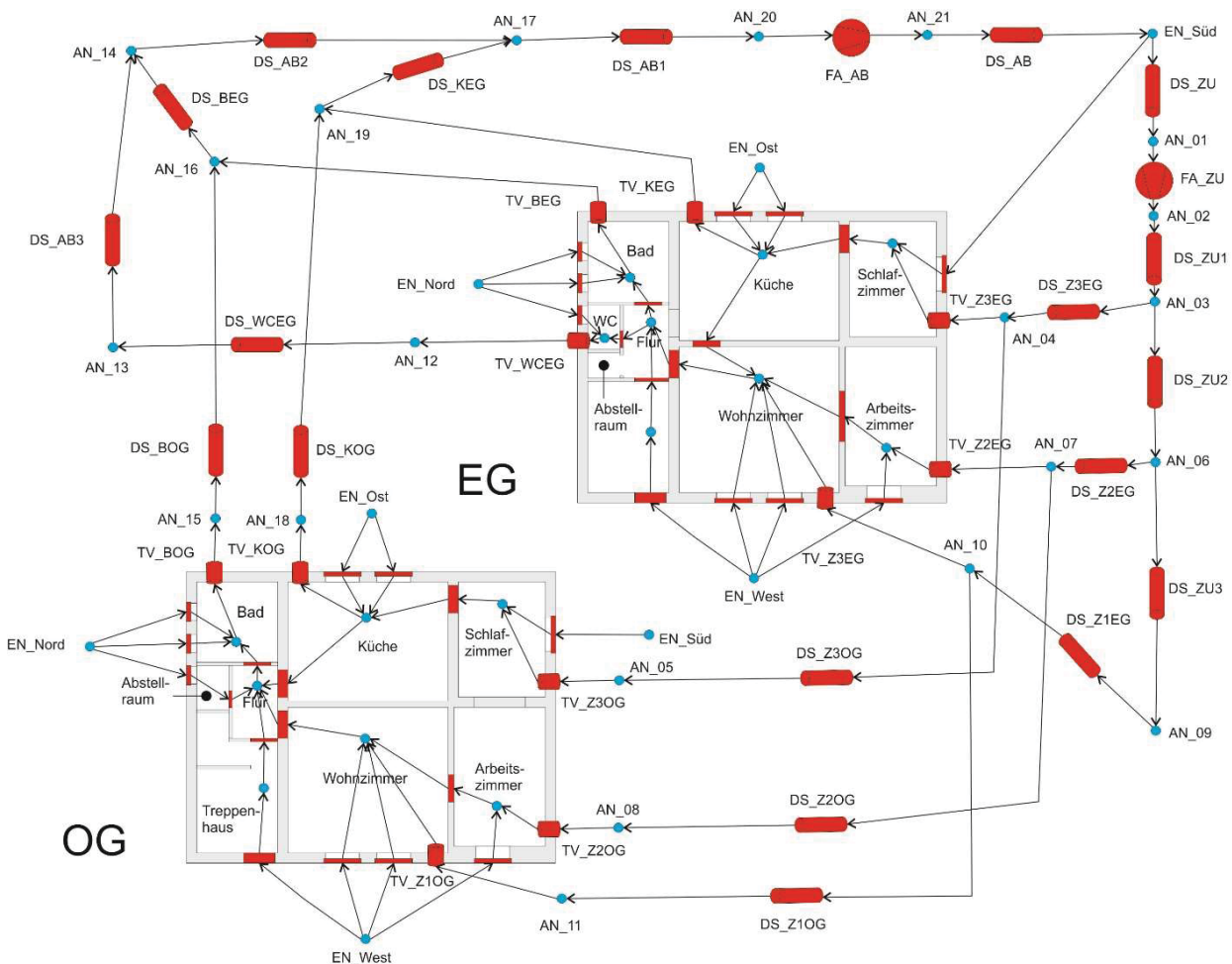


Abb. 72: Luftströmungsmodell des Demonstrationsgebäudes als idealisiertes Netzwerk aus Luftknoten und Strömungsdurchlässen in TRNflow, siehe auch: [Ziegler et al. 2012]

5.5 Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der dynamischen thermisch-hydraulischen Simulationen des Demonstrationsgebäudes vorgestellt. Für die Berechnung werden die in Kapitel 5.3 dargestellten Klima- und Gebäudenutzungsrandbedingungen verwendet. Das zentrale Wohnungslüftungssystem mit Wärmerückgewinnung und fassadenintegrierter Luftkanalführung wird über das angepasste Durchflussmodell aus Kapitel 5.4.1 abgebildet, wodurch die Wärmeverluste während des Betriebs der Anlage bilanziert werden. Die hydraulische Luftverteilung im Gebäude und dem angeschlossenen Luftkanalnetz wird über das Luftströmungsmodell aus Kapitel 5.4.2 berechnet.

5.5.1 Energetische Bilanzierung des Demonstrationsgebäudes

Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf des Gebäudes wird mithilfe der dynamischen Gebäudesimulation für zunächst drei verschiedene bauliche Zustände berechnet. Im Ausgangsfall wird das Gebäude ohne Maßnahmen zur energetischen Sanierung betrachtet. Die Materialkenndaten und Aufbauten der wärmeumschließenden Hüllfläche entsprechen den Werten aus Tab. 2. Die zweite Variante stellt den Zustand des Gebäudes nach der Sanierung der Außenwände mit einem Wärmedämmverbund-System und der Erneuerung des Dachs mit einer Aufsparrendämmung gemäß den Bauteilaufbauten nach Tab. 3 dar. Im dritten untersuchten Fall wird zusätzlich zu den Sanierungsmaßnahmen der Außenwand und der Dachflächen eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) und fassadenintegrierter Luftkanalführung eingebaut. Dieser Zustand entspricht den umgesetzten Sanierungsmaßnahmen am realen Testgebäude in Kassel. Ein Austausch der bestehenden Fensterflächen wird hier vorerst nicht untersucht.

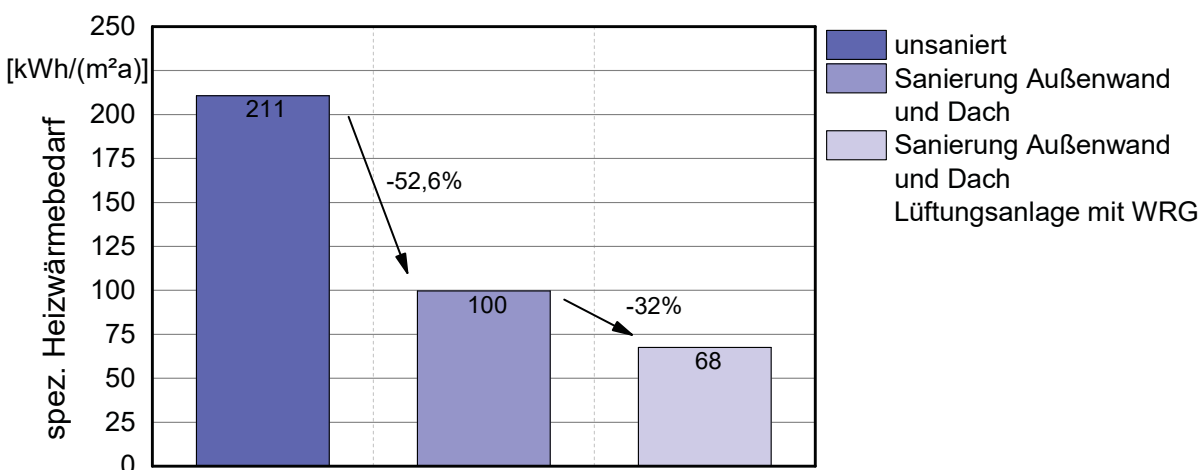


Abb. 73: Vergleich des berechneten spezifischen Heizwärmebedarfs des Gebäudes im unsanierten Zustand, nach der baulichen Sanierung (Außenwand und Dach) und nach der Sanierung der Außenwand- und Dachflächen sowie der Installation einer RLT-Anlage mit fassadenintegrierter Luftkanalführung

Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung für alle Varianten sind in Abb. 73 wiedergegeben. Das unsanierte Gebäude weist einen spezifischen, auf die Gebäudenutzfläche bezogenen jährlichen Heizwärmebedarf von 211 kWh/(m²a) auf. Durch die Dämmung der Außenwände und

der Dachflächen kann der Heizwärmebedarf um etwa 53 % auf 100 kWh/(m²a) gesenkt werden. Der zusätzliche Einbau der zentralen Lüftungsanlage mit WRG vermindert die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes stark und führt zu einer weiteren Reduzierung des Energiebedarfs um 32 % auf einen spezifischen Heizwärmebedarf von 68 kWh/(m²a). Wird diese Variante mit dem Ausgangsfall verglichen, so lässt sich der Heizwärmebedarf auf ein Drittel des Ausgangszustands senken. Der zusätzlich benötigte Hilfsstrombedarf für den Betrieb der Lüftungsanlage wird in Kapitel 7.2.2 berechnet und bewertet.

Wärmeverluste über das Luftkanalnetz

Die Ablufttemperatur aus den Räumen kühlt sich aufgrund der Wärmeverluste im Kanalnetz in Richtung des Lüftungszentralgeräts ab. Im Zuluftkanalnetz strömt die vorgewärmte Kanalluft über die fassadenintegrierte Leitungsführung in Richtung der Wohnräume. Auch hier kommt es zu Wärmeübertragungsvorgängen, die mit dem instationären thermischen Modellansatz aus Kapitel 5.4.1 bilanziert werden. In Abb. 74 sind die berechneten aufsummierten monatlichen Wärmeverluste im Luftkanalnetz über das Jahr, getrennt nach Zuluft- und Abluftstrang, dargestellt. Die jährlichen Wärmeverluste summieren sich insgesamt auf 725 kWh/a.

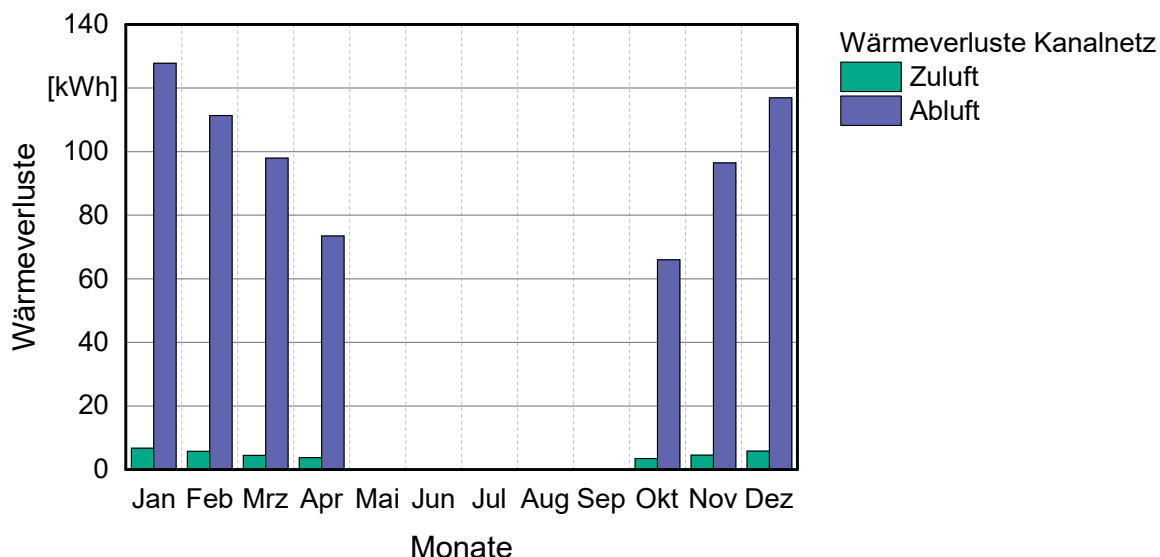


Abb. 74: Berechnete Wärmeverluste in der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung und aufgeteilt nach Zuluft- und Abluftkanalnetz während der Betriebszeit der Lüftungsanlage

Hierbei ist deutlich zu sehen, dass der überwiegende Anteil der Wärmeverluste mit etwa 95 % auf die Abluftkanalführung zurückzuführen ist. Im Vergleich zum Zuluftkanal liegt im Abluftkanal eine höhere Temperaturdifferenz zwischen Kanallufttemperatur und Bauteilschichttemperatur an, sodass auch die Wärmeverluste deutlich höher sind. Die Kanaltemperatur in der Abluft nähert sich nach und nach der anliegenden Schichttemperatur im Dämmstoff an. Nach Durchströmung des Wärmetauschers des Zentralgeräts weist die in den Zuluftkanal strömende Luft nur geringfügig niedrigere Temperaturen auf als die einströmende Kanalabluft am Lüftungsgerät. Die vorgewärmte Zulufttemperatur liegt somit näher an der Schichttemperatur des ungestörten Außenwandquerschnitts und führt aus diesem Grund zu niedrigeren Wärmeverlusten.

Systembezogener Wirkungsgrad des Lüftungssystems

Der Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungsgeräts beschreibt nur die Effizienz des Wärmeübertragers und ist für die Bewertung des angeschlossenen Kanalnetzes nicht ausreichend. Aus diesem Grund muss ein neuer systembezogener Wirkungsgrad für das Lüftungssystem definiert werden, der aus den Ergebnissen der dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationen ermittelt wird. Dazu müssen die während der Betriebszeit der Lüftungsanlage zurückgewonnene Wärmeenergie und die jährlichen Wärmeverluste der Luftkanalführung bestimmt werden. Der Wirkungsgrad des Lüftungssystems wird hierbei wie folgt definiert:

$$\eta_{sys} = \frac{Q_{W\ddot{U}T}}{\frac{Q_{W\ddot{U}T}}{\eta_{W\ddot{U}T}} + Q_{loss}} \quad (5.27)$$

Der systembezogene Wirkungsgrad ergibt sich aus der jährlich am Wärmeübertrager zurückgewonnenen Wärmeenergie $Q_{W\ddot{U}T}$, bezogen auf ein ideales System mit einem Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungsgeräts von 100 % und ohne Wärmeverluste Q_{loss} über das Zu- und Abluftkanalnetz. Aus der thermischen Simulation ergeben sich für die dämmstoff-integrierten Lüftungskanäle jährliche Wärmeverluste von $Q_{loss}=725 \text{ kWh/a}$ und am Wärmeübertrager, mit einem Wirkungsgrad von $\eta_{W\ddot{U}T}=0,9$, ein Wärmerückgewinnungsvermögen von $Q_{W\ddot{U}T}=2867 \text{ kWh/a}$. Mit Gleichung (5.27) berechnet sich der Systemwirkungsgrad des umgesetzten Lüftungssystems auf 73,3%.

5.5.2 Hydraulische Verteilung im Gebäude und Luftkanalnetz

Die Luftvolumenströme und die Infiltrations- und Exfiltrationsraten in den einzelnen Räumen des Gebäudes werden über das Luftströmungsmodell in TRNflow berechnet. Der Ventilator im Zuluftstrang wird mit der 5V-Kennlinie betrieben und im Abluftstrang wird aufgrund der etwas längeren Leitungsführung die 6V-Kennlinie nach Tab. A 13 im Anhang verwendet.

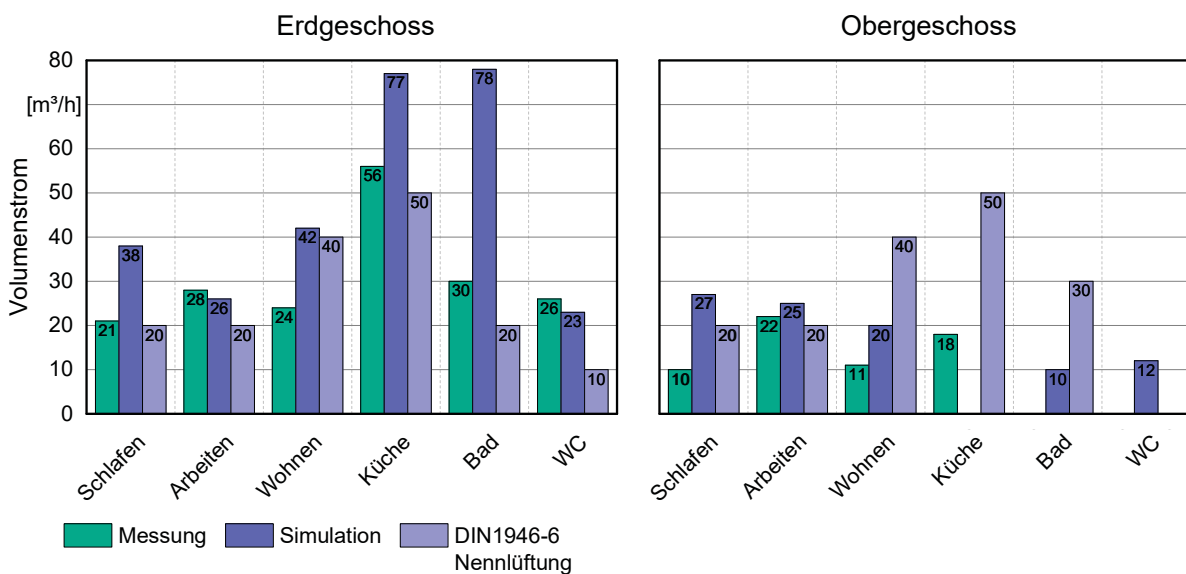


Abb. 75: Vergleich der gemessenen und berechneten Luftvolumenströme beider Geschosse bei freier Verteilung und den Auslegungswerten für Nennlüftung nach [DIN 1946-6]

Die gemessenen und die über die Luftströmungssimulation berechneten mittleren Luftvolumenströme in beiden Geschossen des Gebäudes bei freier Verteilung sind in Abb. 75 gegenübergestellt. Zum Vergleich sind auch die Auslegungswerte nach Nennlüftung gemäß [DIN 1946-6] angegeben. Die Innentüren zwischen den einzelnen Räumen sind während der Messung und der dynamischen Berechnung geöffnet. Die über die Luftströmungssimulation berechneten Zuluft- und Abluftmengen sind jeweils über die Betriebszeit der Lüftungsanlage gemittelt. Es ist zu erkennen, dass die Volumenströme im Erdgeschoss sowohl in den Zuluftbereichen als auch in den Abluftzonen deutlich höher sind als im Obergeschoss. Dies ist auf die längeren Leitungswege und die daraus resultierenden höheren Druckverluste im OG zurückzuführen. Diese Tendenz zeigt sich besonders im Abluftstrang (Küche, Bad, WC), wo die Luftmengen teils um ein Vielfaches höher liegen als im OG. Die gemessenen Werte wurden bei der Einregulierung der Lüftungsanlage ohne Tellerventile bestimmt und dienen hierbei nur dem Verständnis des grundsätzlichen Verhaltens.

Eine ausgeglichene Luftverteilung in beiden Geschossen kann durch zusätzliche Druckverluste an den Ein- und Auslässen der Räume im Erdgeschoss erreicht werden. Bei der Messung wird dies durch eine Verkleinerung des durchströmten Querschnitts des Ventils erreicht. In der Luftströmungssimulation wird jeweils am Ein- und Austritt der Luft im Kanalnetz ein zusätzlicher Druckverlust eingestellt, bis die Auslegungswerte annähernd erreicht werden. In Abb. 76 ist der Vergleich der gemessenen und mit dem Luftströmungsmodell simulierten mittleren Luftvolumenströme bei einjustierten Ventilen beider Geschosse dargestellt. Die Innentüren sind während Messung und Simulation jeweils verschlossen.

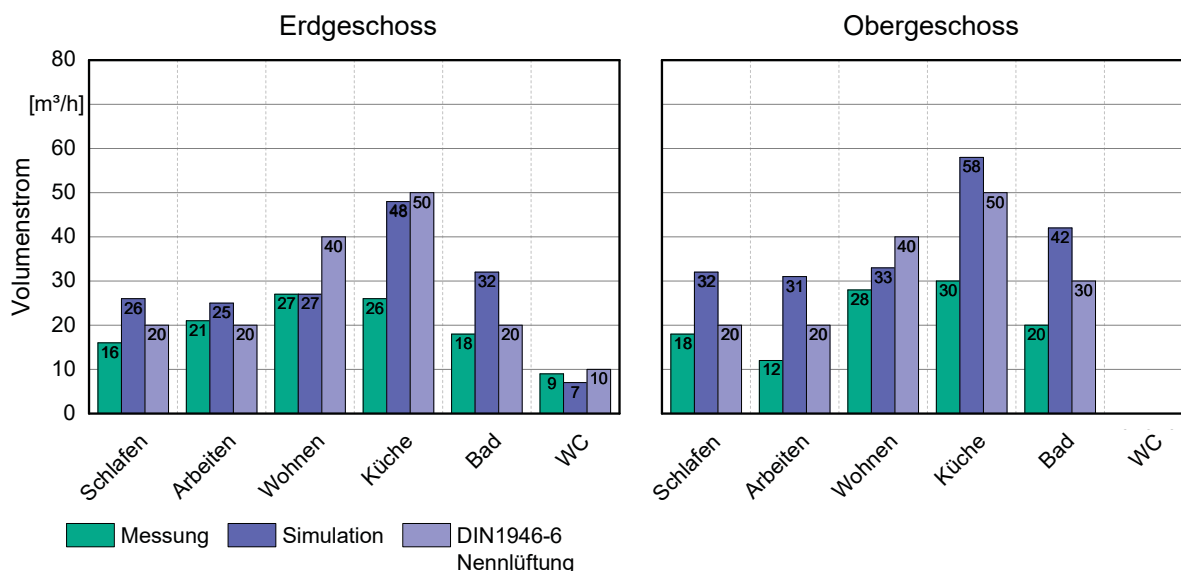


Abb. 76: Vergleich der gemessenen und berechneten Luftvolumenströme beider Geschosse bei einjustierten Ventilen und den Auslegungswerten für Nennlüftung nach [DIN 1946-6]

Die Gegenüberstellung der Luftvolumenströme zeigt, dass ein Abgleich der Luftmengen in beiden Geschossen prinzipiell erreicht werden kann. Die berechneten Zu- und Abluftvolumenströme in der oberen Wohnung liegen mit 13-18 % etwas über den Luftmengen in der unteren Wohnung. Der gesamte berechnete Zu- und Abluftluftvolumenstrom in das Gebäude liegt mit 8 % für den Zuluftbereich bzw. 16 % im Abluftbereich etwas über den Auslegungswerten nach [DIN 1946-6]. Dies ist mit der Auswahl des Kennlinienfelds der Ventilatoren zu erklären. Da die Kennlinien über

Tabellenwerte eingegeben werden, kann der gewünschte Betriebspunkt als Schnittpunkt der Anlagen- und Ventilator Kennlinie nicht exakt erreicht werden.

Die Systemdruckverluste im Zuluft- und Abluftkanalstrang sind zusammen mit der Leistungsaufnahme der Ventilatoren wichtige Kenngrößen, mit denen der Hilfsenergiebedarf der Lüftungsanlage ermittelt werden kann. Parallel zu den dynamischen Simulationen wird der Druckverlust des fassadenintegrierten Luftkanalnetzes statisch mit einem Berechnungsprogramm²¹ bestimmt. Der Systemdruckverlust in der dynamischen Luftströmungssimulation wird der statischen Berechnung gegenübergestellt, allerdings werden die Kanaleinbauten im Keller, wie beispielsweise der Schalldämpfer, und die Kanalverlegung im Keller zunächst nicht erfasst. Der Vergleich dient dazu, die zur Überwindung der Kanaldruckverluste benötigte Druckerhöhung an den beiden Ventilatoren zu ermitteln.

Der Vergleich der gemittelten Druckverluste im Zuluft- und Abluftkanalnetz mit den Werten aus der statischen Berechnung ist in Abb. 77 wiedergegeben. Hier ist zu erkennen, dass der berechnete und der simulierte mittlere Druckverlust im Zuluftkanalnetz mit 25,8 Pa bzw. 26 Pa sehr gut übereinstimmen. Dies bedeutet, dass der Druckverlust des ungünstigsten Zuluftstrangs in der Simulation in der gleichen Größenordnung liegt wie der in der statischen Berechnung. Die Druckverluste im Abluftkanalnetz führen in der Luftströmungssimulation zu einem Systemdruckverlust von 57,8 Pa und liegen damit etwa 11 % über dem Druckverlust in der statischen Berechnung von 52 Pa. Die Unterschiede können auf die höheren Volumenströme in den Ablufträumen insbesondere des Obergeschosses zurückgeführt werden. Durch die höheren Luftmengen ergeben sich höhere Luftgeschwindigkeiten in den Kanälen und somit auch größere Druckverluste. Die in der Luftströmungssimulation höheren Luftmengen gegenüber den Auslegungswerten erklären somit den unterschiedlichen Gesamtdruckverlust.

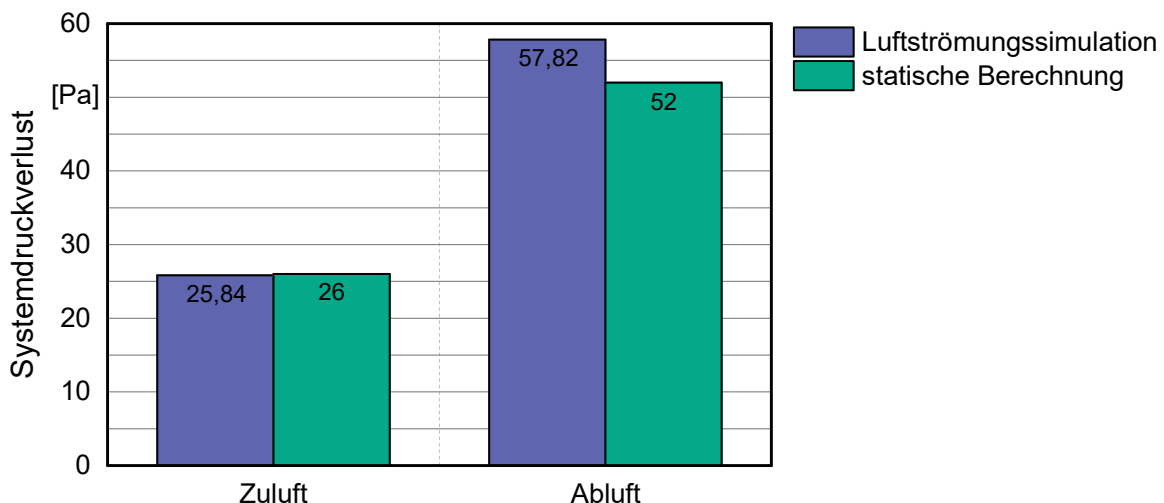


Abb. 77: Vergleich der Systemdruckverluste im Zuluft- und Abluftkanalnetz in der Luftströmungssimulation und bei der statischen Berechnung

²¹ mh-software siehe auch: <http://www.mh-software.de/programme/3-turbo-netze/luftkanalnetzrechnung/01-entwurf.html>

5.5.3 Sensitivitätsanalyse

Die Luftverteilung im Gebäude und im Luftkanalnetz hängt maßgeblich von der Druckerhöhung ab, die von den beiden Ventilatoren hervorgerufen wird. Neben diesen aktiven Elementen beeinflusst der am Gebäude anliegende Winddruck sowie thermisch induzierte Auftriebsströmungen die erreichbaren Zu- und Abluftvolumenströme in den Räumen. Durch die Änderung bestimmter Einflussgrößen, wie die Infiltrationsraten über Undichtigkeiten, der Fensterluftwechsel und Querluftströmungen zwischen den Räumen, soll die Wirkung auf das Gesamtsystem, bestehend aus Gebäude und Luftkanalnetz, mithilfe des Simulationsmodells identifiziert werden. Dies betrifft im Wesentlichen bauliche Komponenten des Luftströmungsnetzwerks, wie die Innentüren und Fenster.

Einfluss der Türstellung

Die Innentüren in den Wohnungen dienen dem Raumabschluss zwischen den einzelnen Zonen im Gebäude. Zur Bestimmung des Einflusses der Türstellung zwischen den beheizten Wohnräumen und dem unbeheizten Flur werden diese gleichzeitig verändert. Türen im geschlossenen Zustand stellen einen Luftspalt dar, der einen Druckverlust in Luftströmungsrichtung verursacht. Bei geöffneten Türen sind aufgrund der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung Strömungen in beide Richtungen möglich. Abb. 78 zeigt den Einfluss der Türstellung auf die erreichbaren Zu- und Abluftvolumenströme in den Räumen beider Geschosse bei geschlossenen Innentüren und im vollständig geöffneten Zustand.

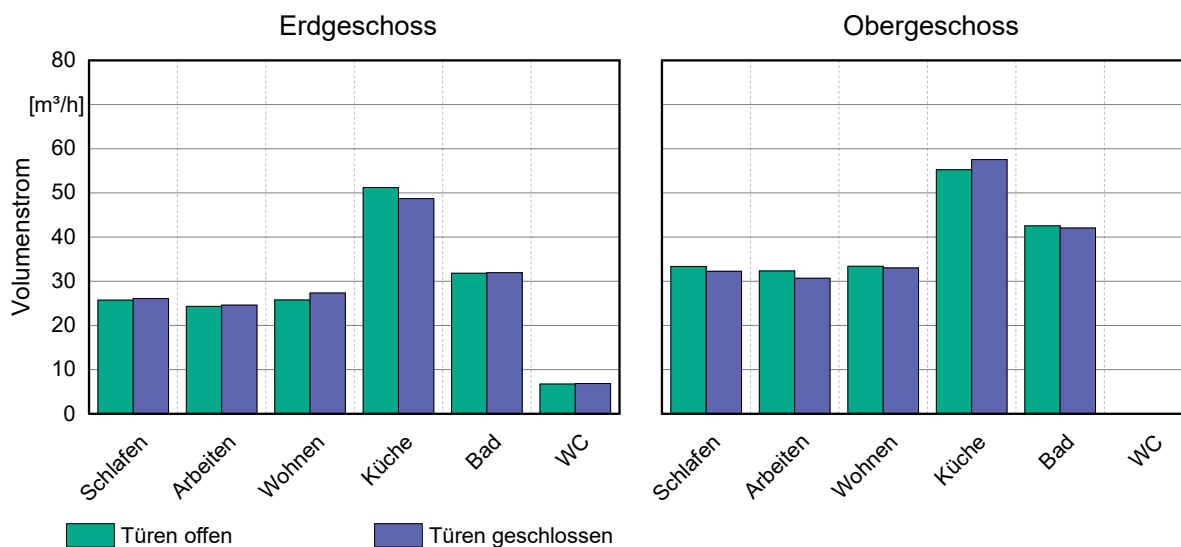


Abb. 78: Einfluss der Türstellung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen

Anhand der Ergebnisse ist zu sehen, dass die Türstellung nur einen sehr geringen Einfluss auf die Luftverteilung in den Räumen hat. So beträgt die maximale relative Änderung des Volumenstroms in den Räumen 5,9 %. Durch das Schließen der Türen vermindert sich der gesamte Zuluftvolumenstrom um etwa 0,8 % und für den gesamten Abluftvolumenstrom ergibt sich eine Reduzierung von 0,2 %. Betrachtet man den Systemdruckverlust bei geschlossenen Türen, so erhöht sich dieser im Zuluftkanalnetz um 2,5 % und im Abluftkanalnetz um 0,8 %. Dies entspricht einem Druckunterschied von 0,65 Pa im Zuluftstrang und 0,4 Pa im Abluftstrang.

Einfluss der Infiltration

Der Einsatz einer mechanischen Zu- und Abluftanlage führt während der Betriebszeit dauerhaft zu einem Überdruck in den Wohnräumen und einem Unterdruck in den Ablufträumen. Daraus ergibt sich im Falle eines Zuluftstroms ein Exfiltrationsluftstrom vom Innenraum über Fensterfugen und andere Fassadenundichtigkeiten nach draußen. Bei Ablufträumen, wie in Küchen und Bädern, stellt sich ein Infiltrationsluftstrom ein. Die Höhe des Luftaustausches zwischen der Raum- und Außenluft hängt vom anliegenden Druckunterschied und der baulichen Ausführung bzw. dem Fugendurchlasskoeffizienten des Luftspalts ab.

Der Einfluss der Infiltration wird anhand von zwei unterschiedlichen Dichtigkeitsausführungen aufgezeigt. Im Ausgangsfall bleiben die Fenster sowie alle Innen- und Außentüren nach der Sanierung des Gebäudes unverändert. In einer weiteren Variante werden die Bestandsfenster und Türen mit neuen Dichtungen und Fensterprofilen ausgestattet. Die verwendeten Werte der Fugendurchlasskoeffizienten für die Untersuchung sind in Tab. A 12 im Anhang zu finden. Der Vergleich der hydraulischen Luftverteilung in den Räumen beider Geschosse mit unterschiedlicher Luftdichtheitsausführung der Fenster und Türen ist in Abb. 79 aufgeführt.

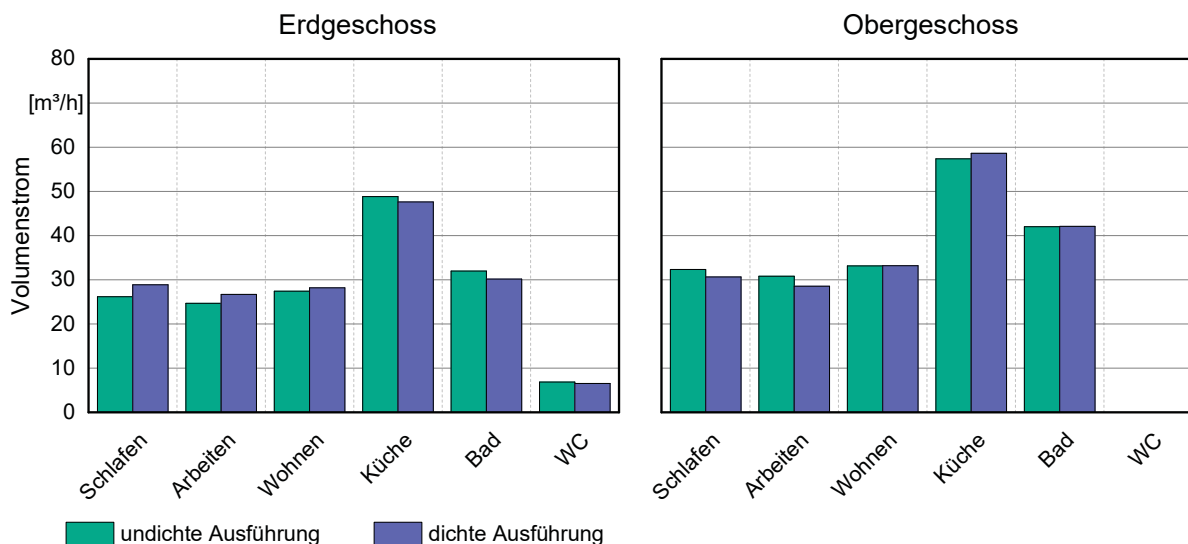


Abb. 79: Einfluss der Infiltrationsvolumenströme bei unterschiedlicher Dichtigkeitsausführung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen

Durch die dichte Ausführung der Fensterfugen erhöht sich der Volumenstrom in den Wohnräumen des Erdgeschosses leicht, während im Obergeschoss ein entgegengesetztes Verhalten festzustellen ist. Die Luftvolumenströme gleichen sich somit in den Zuluftträumen etwas an. Die maximale Abweichung der Luftmengen in den Räumen beträgt 9,3 % im Schlafzimmer des Erdgeschosses (EG). Der gesamte Zuluftvolumenstrom erhöht sich bei dichter Ausführung um 0,9 %. In den Ablufträumen führen die verminderten Infiltrationsraten zu geringeren Luftvolumenströmen im Erdgeschoss und zu etwas höheren Abluftmengen im OG. Die Änderung des Luftvolumenstroms beträgt im höchsten Fall 6 % und der Gesamtabluftstrom verringert sich um 1 %. Die Dichtheitsausführung der Fenster und Türen hat somit nur einen geringen Einfluss auf die hydraulische Luftverteilung in den Räumen. Eine Änderung der Infiltrations- und Exfiltrationsraten in den Räumen wirkt sich jedoch auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes aus.

Je höher die über Undichtigkeiten einströmende Luftmenge ist, desto mehr Heizenergie ist für die Temperierung der Räume notwendig. Ein Vergleich der berechneten Infiltrations- und Exfiltrationsvolumenströme bei unterschiedlicher Dichtigkeitsausführung in den beiden Geschossen ist in Abb. 80 zu sehen. Durch verbesserte Fensterprofile mit geringeren Fugendurchlasskoeffizienten können die Infiltrationsvolumenströme bei Einsatz einer Lüftungsanlage mit konstantem Luftvolumenstrom, wie in diesem Berechnungsbeispiel aufgeführt, teilweise halbiert werden. Der Einfluss der reduzierten Infiltrationsraten auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes wird an dieser Stelle nicht untersucht, sondern in Kapitel 5.5.4 analysiert.

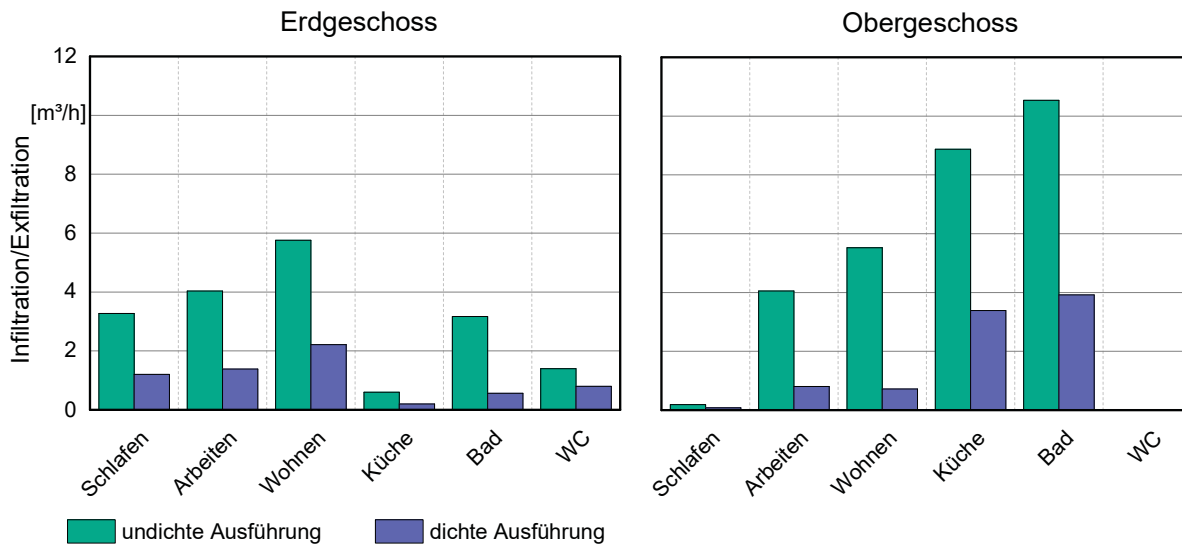


Abb. 80: Vergleich der Infiltrations- und Exfiltrationsvolumenströme bei unterschiedlicher Dichtigkeitsausführung in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen

Einfluss der Fensterstellung

Das Öffnen der Fenster während des Betriebs der Lüftungsanlage beeinflusst die hydraulische Verteilung in den Räumen des Gebäudes. Im Gegensatz zum geschlossenen Fenster, bei dem nur eine Durchströmung der Fensterfuge in eine Richtung, je nach Über- oder Unterdruck möglich ist, können bei Fenstern mit geöffnetem Fensterflügel gleichzeitig Infiltrations- und Exfiltrationsraten auftreten. Dazu wird ein zusätzlicher Fensterluftwechsel eingestellt, indem die Fenster in allen Räumen dreimal am Tag für eine Stunde (7 Uhr bis 8 Uhr, 12 Uhr bis 13 Uhr und 17 Uhr bis 18 Uhr) mit einem Öffnungsfaktor von 0,05 versehen werden. Der daraus resultierende zusätzliche Fensterluftwechsel während diesen Zeiten beträgt je nach Raum zwischen 1 h^{-1} und $1,5 \text{ h}^{-1}$. Die Auswirkung des Fensterluftwechsels auf die Luftverteilung wird anhand der ersten Januarwoche des simulierten Jahresverlaufs bei kalten Außentemperaturen analysiert. Der Verlauf der Luftvolumenströme in den Räumen bei geöffneten und geschlossenen Fenstern im Erdgeschoss ist in Abb. 81 dargestellt.

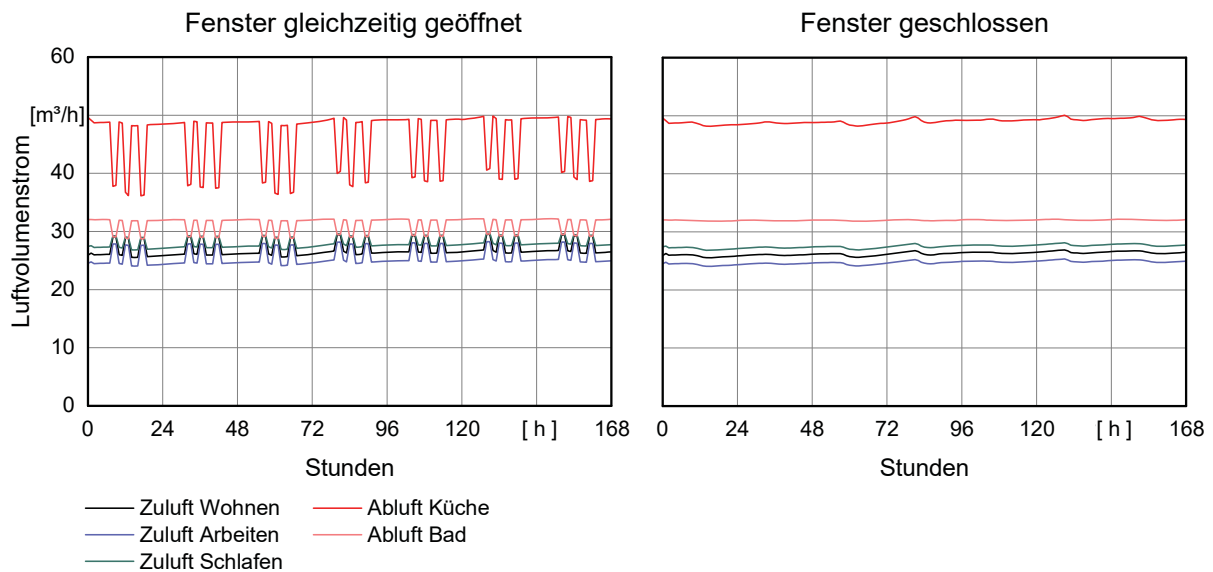


Abb. 81: Einfluss der Fensterstellung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen im Erdgeschoss während der ersten Januarwoche

Der Zu- und Abluftvolumenstrom in den Räumen ohne zusätzlichen Fensterluftwechsel zeigt einen gleichmäßigen Verlauf ohne große Schwankungen. Bei geöffneten Fenstern ist in den Ablufträumen ein Absinken des Luftvolumenstroms um bis zu $10 \text{ m}^3/\text{h}$ festzustellen. In den Wohnräumen steigt die Zuluftmenge bei offenem Fenster um etwa $3 \text{ m}^3/\text{h}$ an und stabilisiert sich nach dem Schließen der Fenster wieder. Die Luftverteilung im Obergeschoss bei geöffneten und geschlossenen Fenstern während der ersten Januarwoche ist in Abb. A 21 im Anhang dargestellt. Hier steigt der Luftvolumenstrom der Ablufträume während der Fensterlüftung an und bei den Zulufräumen ist ein leichtes Absinken der Volumenströme zu erkennen.

Zusammenfassende Bewertung

Die erreichbaren Zu- und Abluftmengen in den einzelnen Räumen des Gebäudes werden maßgeblich durch die Druckerhöhung an den Ventilatoren der Lüftungsanlage bestimmt und können mithilfe eines pneumatischen Abgleichs durch den gezielten Einbau zusätzlicher Druckverluste in bestimmten Teilsträngen der Kanalführung eingeregelt werden. Die Änderung des Druckabfalls an einzelnen Strömungsdurchlässen kann zu einer unterschiedlichen hydraulischen Verteilung im Gebäude und letztendlich zu höheren oder niedrigeren Luftvolumenströmen in den Räumen führen. Dies kann innerhalb der thermisch-hydraulischen Gebäudesimulation durch Variation der baulichen Eigenschaften der Fenster und Türen oder durch das Nutzerverhalten, also gezieltes Öffnen und Schließen der Fenster, abgebildet werden.

Die Untersuchung der Türstellung hat gezeigt, dass das Öffnen und Schließen der Innentüren den Luftaustausch zwischen den Zonen des Gebäudes nur geringfügig verändert und somit nahezu keine Auswirkung auf die hydraulische Luftverteilung zeigt. Die Variation der Luftdichtheit der Fensterfugen führt zu keiner wesentlichen Änderung der Luftvolumenströme in den Räumen. Bei einer dichteren Ausführung sinken jedoch die Infiltrations- und Exfiltrationsraten deutlich und reduzieren den Lüftungswärmeverlust über die Fenster. So kann die Energieeinsparung, die durch den Einsatz einer mechanischen Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung erzielt werden kann, durch eine mangelhafte Luftdichtheit der Fensterfugen wieder eingebüßt werden.

Den größten Einfluss auf die Luftverteilung, die durch die Lüftungsanlage erzeugt wird, stellt die Lüftung bei geöffnetem Fenster dar. Die Fensterlüftung während des Betriebs der Lüftungsanlage verursacht große Schwankungen und führt teilweise zu einem Einbruch der Zu- und Abluftvolumenströme. Bei Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung wird zur Sicherstellung eines hygienischen Mindestluftwechsels kein zusätzlicher Luftaustausch durch das Öffnen der Fenster benötigt. Hierauf sollte möglichst verzichtet werden, da dies zudem zu einem hohen Lüftungswärmeverlust führt.

5.5.4 Variation der Systemgrößen auf die Energiebilanz des Gebäudes

Im folgenden Abschnitt wird die Auswirkung verschiedener baulicher Änderungen des innovativen Sanierungssystems auf das energetische Verhalten des Gebäudes analysiert. Beispielhaft wird hierbei sowohl ein zusätzlicher Austausch der alten Fenster betrachtet als auch die Lage der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle innerhalb der Wärmedämmschicht variiert.

Einfluss des Fensteraustauschs

Bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden werden meist die Außenwände mit einem Wärmedämmverbund-System ausgestattet und gleichzeitig die bestehenden Fenster ausgetauscht. Mit der Installation einer mechanischen Lüftungsanlage kann ein ausreichender Luftwechsel bei einer nun deutlich luftdichteren Gebäudehülle sichergestellt werden. Bei Verwendung einer Wärmerückgewinnung können zusätzlich die Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Am Demonstrationsgebäude wurden die alten Fenster nicht ersetzt. Daher soll untersucht werden, inwieweit sich der Heizwärmebedarf des Gebäudes nach der Sanierung der Außenwand durch die gleichzeitige Erneuerung der alten Fenster weiter senken lässt und welche zusätzliche Energieeinsparung dann durch den Einsatz der Lüftungsanlage erzielt werden kann. Dazu werden im Ausgangsfall die Materialkenndaten der Bauteilaufbauten aus Tab. 2 und nach der energetischen Sanierung aus Tab. 3 verwendet. Der Wärmedurchgangskoeffizient der neuen Wärmeschutz-Isolierverglasung wird mit einem Wert von $U=1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt und im Strömungsnetzwerk wird der Fugendurchlasskoeffizient der nun luftdichten Fensterfugen auf $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$ bei einem Druckunterschied von 1 Pa angenommen.

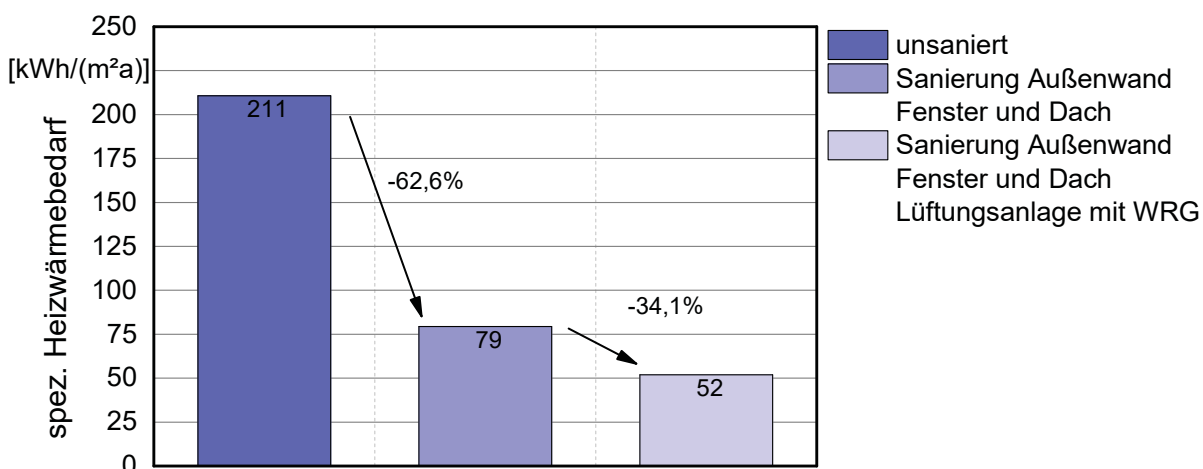


Abb. 82: Vergleich des berechneten spezifischen Heizwärmebedarfs des Gebäudes im unsanierten Zustand, nach der baulichen Sanierung (Außenwand, Fenster und Dach) und nach der zusätzlichen Installation einer RLT-Anlage mit fassadenintegrierter Luftkanalführung

Die Gegenüberstellung der jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfe der untersuchten Varianten ist in Abb. 82 zu sehen. Der Heizwärmebedarf des Gebäudes kann durch die bauliche Sanierung der Außenwände mit einem WDVS, dem Austausch der alten Fenster und der Sanierung der Dachflächen mit einer Aufsparrendämmung von 211 kWh/(m²a) im ursprünglichen Zustand auf 79 kWh/(m²a) gesenkt werden. Dies entspricht einer Einsparung von etwa 63 %. Durch den Einsatz der mechanischen Lüftungsanlage mit fassadenintegrierter Luftkanalführung kann der Energiebedarf weiter reduziert werden. Der jährliche Heizwärmebedarf beträgt nun 52 kWh/(m²a), was einer weiteren Reduzierung um ca. 34 % entspricht. Dies führt in etwa auf die gleiche prozentuale Einsparung wie beim alleinigen Anbringen des WDVS ohne Fenster-austausch.

Änderung der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Luftkanäle

Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle weisen einen freien Querschnitt von 30 mm x 300 mm auf und liegen in einer Tiefe von 100 mm im Dämmstoff. Bei Durchströmung mit warmer oder vorgewärmter Luft führt die fassadenintegrierte Luftkanalführung während des Betriebs der Lüftungsanlage zu Wärmeverlusten.

Der Einfluss der Dämmstoffüberdeckung auf den jährlichen Heizwärmebedarf sowie die Effizienz des gesamten Lüftungssystems soll im Folgenden untersucht werden. Dabei wird bei konstantem Lüftungsquerschnitt und einer Dämmstoffdicke von 160 mm die Lage der Luftkanäle innerhalb der Dämmstoffplatten von einer Tiefe von 6 cm bis maximal 14 cm variiert. Zunächst wird der jährliche Heizwärmebedarf des Gebäudes für den Sanierungsfall ohne Austausch der alten Fenster mit Zu- und Abluftanlage und fassadenintegrierter Luftkanalführung analysiert. Der Vergleich der Heizwärmebedarfe bei Variation der Dämmstoffüberdeckung wird in Abb. 83 aufgezeigt. Hier ist zu sehen, dass der jährliche Energiebedarf zur Beheizung des Gebäudes mit steigender Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle sinkt. Die Plattenausführung mit einer Überdeckung von 10 cm entspricht dem am Demonstrationsgebäude verbauten System. Der spezifische Bedarf mindert sich etwa um 2,2 % je Erhöhung der Überdeckung um 2 cm.

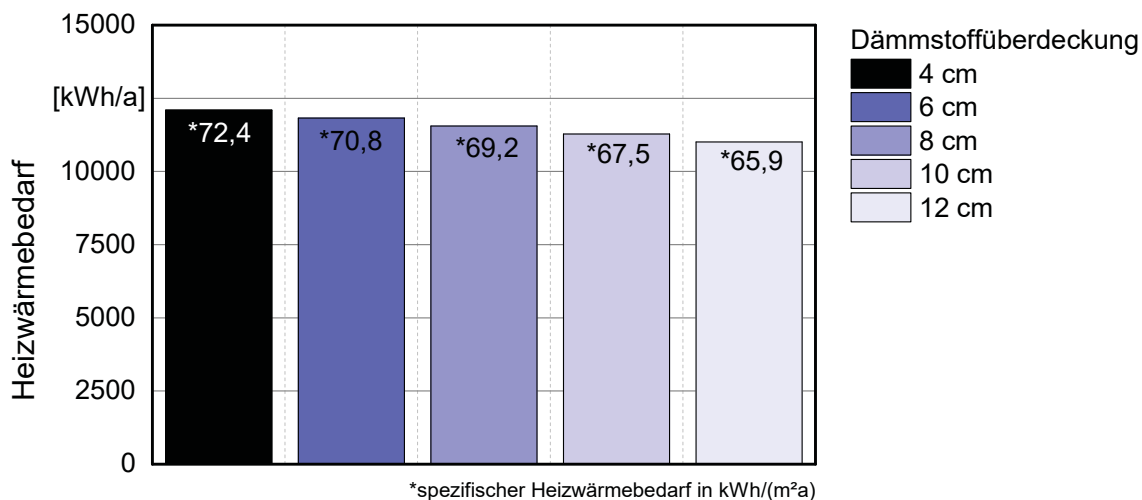


Abb. 83: Vergleich der Heizwärmebedarfe des sanierten Gebäudes ohne Austausch der Fenster bei Variation der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle

Durch den größeren Wärmewiderstand aufgrund der höheren Dämmstoffüberdeckung nach außen steigt die am Lüftungskanal anliegende Oberflächentemperatur, wodurch der Temperaturgradient zwischen Kanalluft und Kanaloberfläche kleiner wird und so zu einem geringeren Wärmestrom führt. Eine Gegenüberstellung der am Wärmeübertrager zurückgewonnenen jährlichen Wärmemenge und den über die fassadenintegrierte Luftkanalführung verursachten Wärmeverluste bei veränderter Dämmstoffüberdeckung ist in Abb. 84 wiedergegeben.

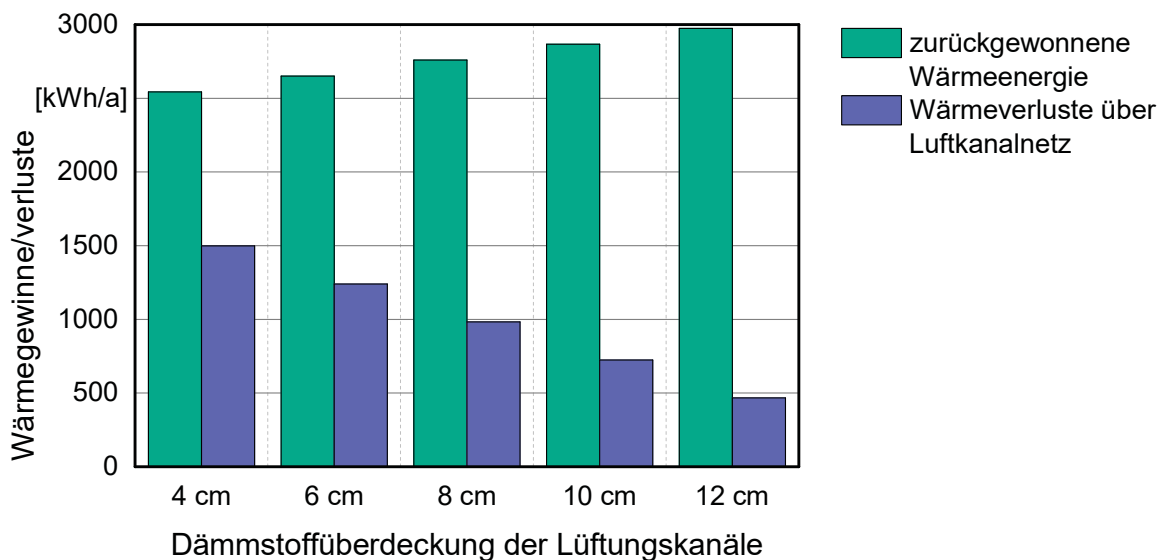


Abb. 84: Jährliche am Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts zurückgewonnene Wärmeenergie und Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes des sanierten Gebäudes ohne Fensteraustausch mit fassadenintegrierter Luftkanalführung bei variierter Dämmstoffüberdeckung

Hier ist zu erkennen, dass mit zunehmender Dämmstoffüberdeckung die am Wärmeübertrager zurückgewinnbare Wärmeübertragungsenergie ansteigt und gleichermaßen die Wärmeverluste über die fassadenintegrierte Luftkanalführung geringer werden. Das Verhältnis der über das Kanalnetz abfließenden Wärmeenergie zur zurückgeführten Wärmemenge beträgt im Falle einer Dämmstoffüberdeckung von 12 cm etwa 16 % und steigt bei einer Dämmschichtdicke von nur 4 cm auf etwa 60 % an.

Eine Analyse des Einflusses der Dämmstoffüberdeckung auf den Systemwirkungsgrad des Lüftungssystems wird bei zusätzlichem Austausch der alten Fenster gemäß den Materialkennwerten der neuen Fenster durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Anhang in Abb. A 22 und Abb. A 23 zu finden. Hier zeigt sich ein nahezu gleiches Verhalten wie bei der Sanierung ohne Fensteraustausch. Aufgrund des etwas geringeren Heizwärmebedarfs liegen die Raumtemperaturen in den Übergangszeiten etwas höher als im Falle ohne zusätzlichen Fensteraustausch, was dazu führt, dass die Lufttemperatur am Eingang in den Abluftkanalstrang etwas höhere Werte aufweist als im Falle unsanierter Fenster, sodass die während der Betriebszeit der Lüftungsanlage anfallenden Wärmeverluste etwas höher liegen. Die zurückgeführte Wärmeenergie während der Heizperiode ist ebenfalls etwas höher als bei den entsprechenden Varianten ohne Fensteraustausch. Der Systemwirkungsgrad des Lüftungssystems mit und ohne Fensteraustausch wird für die unterschiedlichen Varianten nach Formel (5.27) berechnet und ist in Tab. 6 dargestellt. Mit zunehmender Dämmstoffüberdeckung erhöht

sich der Wirkungsgrad des Lüftungssystems. So beträgt die Effizienz des Lüftungssystems ohne Ersatz der alten Fenster bei einer Schichtdicke von 4 cm etwa 59 % und steigt bis zu einer Überdeckung von 12 cm auf einen Wert von knapp 79 % an. Die Wärmeverluste über das Luftkanalnetz verringern somit die über den Wärmeübertrager des Lüftungszentralgeräts zurückführbare Energie und mindern dadurch die Gesamteffizienz des Systems.

Tab. 6: Systemwirkungsgrad des fassadenintegrierten Lüftungssystems bei Variation der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle mit und ohne zusätzlichen Fensteraustausch

Dämmstoffüberdeckung der fassadenintegrierten Lüftungskanäle [cm]	Systemwirkungsgrad des Lüftungssystems [%]	
	ohne Fensteraustausch	mit Fensteraustausch
4	58,9	58,6
6	63,3	63,1
8	68,2	67,9
10	73,3	73,0
12	78,9	78,4

5.6 Zusammenfassende Bewertung

Ziel dieses Kapitels ist die gesamtenergetische Beurteilung und Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Sanierungssystems mit fassadenintegrierten Lüftungskanälen, für die die Entwicklung eines thermisch-hydraulisch gekoppelten Simulationsmodells benötigt wurde. Die Ergebnisse der vorangegangenen methodischen Untersuchungen, der messtechnischen Analyse anhand realer Messdaten und der hydraulischen Bewertung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle helfen dabei, das entwickelte Simulationsmodell zu überprüfen und liefern die benötigten Systemparameter und Kennwerte als Eingangsparameter für die Simulation.

Für die Untersuchungen wird die Simulationsumgebung TRNSYS 17 verwendet. Das Gesamtsystem besteht aus einem detaillierten Gebäudemodell mit je einer Zone für jeden Raum, einem dynamischen Anlagenmodell, um die thermischen Vorgänge im fassadenintegrierten Luftkanalnetz abzubilden, und einer Luftströmungssimulation für die Berechnung der Luftströme in den Zonen des Gebäudes.

Mithilfe des Gebäudemodells wird die Energieeinsparung durch den Vergleich des Heizwärmebedarfs vor und nach der Sanierung des Gebäudes mit dem fassadenintegrierten Lüftungssystem ermittelt. Die für die thermische Gebäudesimulation zugrunde liegenden Randbedingungen orientieren sich an den Nutzungsrandbedingungen für Wohngebäude nach [DIN 18599-10] und den Klimadatensätzen des Testreferenzjahres der Klimaregion für Kassel. Die fassadengeführte Luftkanalführung wird zunächst über einen statischen Ansatz abgebildet, um die sich einstellenden Wärmebrückenverlustkoeffizienten berechnen zu können. Die berechneten Werte liegen im Bereich von 0,011 W/(mK) und 0,05 W/(mK) und korrelieren dabei mit den aus den Messdaten gebildeten Werten. Der in der Simulation implementierte Modellansatz zur Quantifizierung der Wärmegewinne und Wärmeverluste der Luftkanalführung wird über ein dynamisches Durchflussmodell realisiert. Auf eine komplexe CFD-Simulation der Luftkanäle wird bewusst verzichtet, da die Berechnung der Wärmezu- und -abflüsse sowie die sich einstellenden Lufttemperaturen für die energetische Bilanzierung im Modell als ausreichend

erachtet werden. Zum Abgleich der Temperaturentwicklung entlang der Luftkanalführung werden reale Messdaten verwendet. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen am jeweiligen Austritt aus dem Luftkanalnetz zeigt in den Zuluftkanälen eine gute Übereinstimmung mit einer mittleren Abweichung von etwa 0,5 K. Im Abluftkanalnetz liegen die gemessenen Temperaturen am Austritt mit 0,5-2,5 K deutlich unterhalb der simulierten Temperaturen. Grund hierfür sind die Leckagen und identifizierten Undichtigkeiten im Bereich des zentralen Sammelkanals. Die Luftmengen in den Räumen des Gebäudes werden mithilfe eines Luftknotenmodells in TRNflow berechnet. So kann der Einfluss der wetterabhängigen Temperatur- und Druckgradienten auf die hydraulische Luftverteilung untersucht und bewertet werden.

Der berechnete Heizwärmebedarf des Gebäudes reduziert sich durch die baulichen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zum Ausgangszustand um etwa die Hälfte und die zusätzliche Energieeinsparung, die durch Nutzung des zentralen Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung erzielt werden kann, beträgt für das Zweifamilienhaus in Kassel 32 %. Die Ergebnisse der Luftströmungssimulation mithilfe des Knotenmodells zeigen, dass nach Einjustieren der Luftmengen an den Ventilen der Räume eine gleichmäßige Luftverteilung gemäß den Auslegungswerten erreicht werden kann. Im Vergleich zu einer statischen Berechnung ergibt sich in der dynamischen Simulation ein nahezu gleicher Systemdruckverlust im Zuluft- und Abluftstrang des Lüftungssystems. Die Auswirkung bestimmter Einflussfaktoren auf die Luftverteilung in den beiden Geschossen des Gebäudes wird über eine Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Änderung der Infiltrationsraten durch Undichtigkeiten der Fenster und Querströmungen aufgrund veränderter Türstellungen spielen für die erreichbaren Luftmengen bei Nutzung des zentralen Lüftungssystems in den Räumen keine wesentliche Rolle. Der Einfluss der Fensterstellung wird durch mehrmaliges Öffnen der Fenster simuliert und führt zu großen Schwankungen der Zuluft- und Abluftvolumenströme in den jeweiligen Räumen des Gebäudes. Im Zuge der energetischen Sanierung wurden die bestehenden Fenster des Demonstrationsgebäudes nicht ersetzt. Mithilfe des Simulationsmodells kann die Energieeinsparung, die sich durch den Austausch der alten Fenster ergibt, quantifiziert werden. Die Gegenüberstellung des sanierten Gebäudes mit zusätzlichem Fensteraustausch mit dem Ausgangszustand zeigt, dass der Energiebedarf um fast zwei Drittel gesenkt werden kann. Durch Installation des zentralen Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung lässt sich eine weitere Reduzierung des Heizwärmebedarfs um 34 % erreichen.

Die Luftkanäle in der Fassade führen während des Betriebes der Lüftungsanlage zu Wärmeverlusten, die sich auf die Effizienz des Gesamtsystems auswirken. Bilanziert man diese Wärmeabflüsse über die Luftkanalführung, so erhält man einen Systemwirkungsgrad für das Lüftungssystem bei einer Dämmstoffüberdeckung von 10 cm von 73,3 %. Eine Variation der Lage der Lüftungskanäle innerhalb des Außenwandquerschnitts führt zu unterschiedlich hohen Wärmeverlusten über die Leitungsführung. Reduziert man die Dämmstoffüberdeckung der luftführenden Kanäle, so vermindert sich der Wirkungsgrad des Lüftungssystems um etwa 2,5 Prozentpunkte je Zentimeter Dämmschicht.

6 Fassadengeführte Luftkanalsysteme im Mehrgeschosswohnungsbau

6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die im vorhergehenden Kapitel entwickelte Methodik zur gesamtenergetischen Bewertung eines Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung soll nun auch auf größere Wohngebäude, wie Mehrfamilienhäuser, angewendet werden. Die Planung der Luftkanalverlegung auf der Fassade gestaltet sich bei größeren Bauten jedoch nicht so einfach wie bei der Ausführung am Demonstrationsgebäude in Kassel. Gründe hierfür sind systembedingte Abhängigkeiten durch die Anzahl und Größe der benötigten Kanäle sowie bauliche Abhängigkeiten, wie die Grundriss- und Fassadengestaltung der Gebäude, sodass die Platzierung der Luftkanalführung in der Fassadenebene nicht immer ohne Weiteres realisiert werden kann. Hinzukommen höhere Brandschutzanforderungen an Bauteilkonstruktionen und die verwendbaren Baustoffe.

Ziel der Untersuchungen in diesem Kapitel ist es, am Beispiel von repräsentativen Wohngebäuden diese baulichen Abhängigkeiten zu analysieren und Lösungen für die praktische Anwendung zu entwickeln. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Hinweise für mögliche Anpassungen des Designs der Dämmstoffplatten und der Geometrie des Lüftungskanals für unterschiedliche Gebäudegrößen. Insbesondere sollen damit die Potentiale und Systemgrenzen für ein zentrales Lüftungssystem mit WRG und fassadenintegrierter Luftkanalführung im Mehrgeschosswohnungsbau aufgezeigt werden.

Zunächst werden die Potentiale für eine energetische Sanierung der Außenwand mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen im deutschen Wohnungsbaubestand, anhand der Musterbauordnung, analysiert. Anschließend werden die baulichen Abhängigkeiten und einschränkenden Faktoren für die Luftkanalanordnung in der Fassadenebene identifiziert und passende Lösungen für die unterschiedlichen Gebäudeklassen erarbeitet.

Im Folgenden werden nur Wohngebäude und keine Nichtwohngebäude, wie Büro- und Verwaltungsbauten oder Sonderbauten, betrachtet. In Nichtwohngebäuden werden häufig raumluftechnische Anlagen eingesetzt, die mehrere Luftbehandlungsstufen wie Heizen, Kühlen, Befeuchten oder Entfeuchten beinhalten. Aus diesem Grund ergeben sich teilweise auch höhere Anforderungen an die Leitungsführung, die eingesetzten Kanalmaterialien und die Wartung und Inspektion der Lüftungskanäle. Bei der Dimensionierung der Luftvolumenströme für Wohngebäude wird die Auslegung nach [DIN 1946-6] vorgenommen, während bei Büro- und Verwaltungsgebäuden auch Bestimmungen aus [DIN EN 13779] und [DIN EN 15251] berücksichtigt werden sollten.





Anhand konkreter Fallbeispiele für ausgewählte Gebäude wird dann in Kapitel 7 die entwickelte Methodik zur gesamtenergetischen Bewertung des Sanierungssystems mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen angewendet.

6.2 Potentiale ausgehend von der deutschen Gebäudetypologie

Um die Marktpotentiale für die Sanierung von Wohngebäuden mit einer in die Fassadendämmung integrierte Luftkanalführung abzuschätzen, wird der deutsche Wohngebäudebestand mithilfe der Gebäudetypologie nach [Diefenbach et al. 2010] systematisch beschrieben und charakterisiert. Bei dieser Methodik wurden über öffentliche Statistiken und Erhebungen, wie Umfragen bei Energieberatungen, die Gebäude nach Größe, Baualter und Gebäudetyp in verschiedene Klassen unterteilt. Das Baualter spielt hierbei eine wesentliche Rolle, um auf konstruktive und bauliche Merkmale der Häuser zu schließen. Die unterschiedlichen Baualtersklassen richten sich dabei an Bauepochen mit jeweils ähnlichen Bauweisen und gleichen, wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften. Der deutsche Wohngebäudebestand wird in der Wohngebäudetypologie [Born et al. 2011] in folgende Gebäudetypen unterteilt: Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), Mehrfamilienhäuser (MFH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH). Der Gebäudetyp GMH wird für die nachfolgende Potentialanalyse nicht betrachtet, da es sich hauptsächlich um Hochhäuser handelt, die bei der energetischen Sanierung zu komplizierteren Sonderlösungen führen. Die Baualtersklassen A und B fassen Gebäude in Fachwerk- und Massivbauweise zusammen, die vor dem Jahr 1919 errichtet wurden. Viele dieser Bauten zeichnen sich durch monolithische Außenwände mit Sichtmauerwerk aus und verfügen sehr häufig über erhaltenswerte Stuckverzierungen an denkmalgeschützten Straßenfassaden, sodass eine Sanierung mit Außenwanddämmung aus Gründen der Baukultur und des Denkmalschutzes oft nicht möglich ist.

Nachkriegsgebäude der 1950er bis 1970er Jahre (Baualtersklasse D-F) eignen sich besonders für die energetische Sanierung mit einem WDV-System und damit auch für ein Sanierungssystem mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen. Diese Gebäude sind überwiegend baustoffsparend mit Wänden aus Trümmermaterialien oder Substitutionsbaustoffen errichtet und befinden sich zum Großteil in einem schlechten Zustand. Ein überwiegender Anteil dieser Gebäude ist energetisch noch unsaniert oder teilsaniert [Diefenbach et al. 2010], sodass eine energetische Modernisierung ein hohes Energieeinsparpotential verspricht. Insbesondere wenn ohnehin der Austausch der Fenster ansteht, muss grundsätzlich ein Lüftungskonzept nach [DIN 1946-6] erstellt werden. Das äußere Erscheinungsbild der Bauten der Wiederaufbaujahre wird vornehmlich von Putzfassaden ohne Verzierungen oder ausschmückende Elemente dominiert, sodass selten Auflagen aus Gründen des Denkmalschutzes vorliegen. In Tab. 7 ist die zahlenmäßige Verteilung und Häufigkeit der relevanten Baualtersklassen der Mehrfamilienhäuser nach [Born et al. 2011] wiedergegeben, die sich für die energetische Sanierung der Gebäudehülle und ein System mit fassadenintegrierter Luftkanalführung eignen.

Tab. 7: Häufigkeit, mittlerer spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeinsparpotential für Baualtersklassen des Gebäudetyps MFH für die Sanierung der Gebäudehülle nach [Born et al. 2011]

Mehrfamilienhäuser	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978
Baualtersklasse	MFH C	MFH D	MFH E	MFH F
Beispielfoto				
Wohnfläche in Mio. m ²	134	131	197	109
Anzahl Wohnungen in Tsd.	1920	2000	2800	1500
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	460	390	550	320
Ist-Zustand Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a)	193	211	168	139
Einsparpotential in %	>50	>50	>55	>40

Im Ist-Zustand weisen die Gebäude spezifische Heizwärmebedarfe von 140 kWh/(m²a) bis über 200 kWh/(m²a) auf und können durch die Dämmung der Außenwand- und Dachflächen sowie der Erneuerung der Fenster in etwa halbiert werden. Mit dem zusätzlichen Einsatz des fassadenintegrierten Lüftungssystems kann der spezifische Heizwärmebedarf im Vergleich zum unsanierten Zustand weiter reduziert werden. Hier ist zu beachten, dass ein Teil des oben aufgeführten Altbaubestands schon teilsaniert ist und somit das Energieeinsparpotential von den Durchschnittswerten abweichen kann. Jedes Gebäude sollte daher individuell betrachtet werden, um die jeweils geeignetsten Maßnahmen zur energetischen Sanierung durchzuführen. Eine Zusammenstellung der Häufigkeit und spezifischen Heizwärmebedarfe der Gebäudetypen Einfamilienhäuser und Reihenhäuser sind in Tabellenform im Anhang in Tab. A 14 und Tab. A 15 abgebildet.

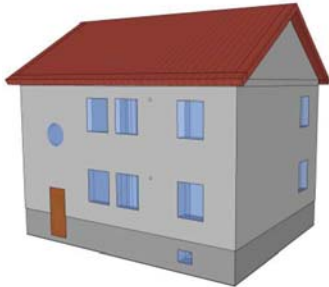
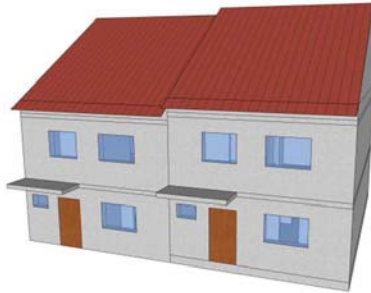


Die Typologie des Wohngebäudebestands nach [Diefenbach et al. 2010] eignet sich für die Abschätzung der Sanierungspotentiale für ein Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung. Die berechneten Heizwärmeeinsparungen sind nach [Born et al. 2011] mithilfe von insgesamt 31 typischen hessischen Wohngebäuden der jeweiligen Gebäudealtersklasse und des entsprechenden Gebäudetyps vorgenommen worden und umfassen den Austausch der Bestandsfenster sowie eine Dach- und Außenwanddämmung. Durch den Einsatz des Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung sind zusätzliche Einsparungen von 20-40 % zu erwarten.

6.3 Bauliche Abhängigkeiten und einschränkende Faktoren für die Luftkanalführung

Die Identifizierung baulicher Abhängigkeiten zur Planung von fassadenintegrierten Luftkanalsystemen für kleine Wohngebäude und im Mehrgeschosswohnungsbau erfolgt anhand mehrerer Beispielgebäude. Die Auswahl der Gebäude orientiert sich an den Gebäudeklassen der deutschen Musterbauordnung [ARGE Bau 2008], da sie im Gegensatz zu den gängigen Gebäudetypologien auch geltende Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und den Feuerwiderstand von Bauteilen enthalten. In Tab. 8 sind die Gebäudeklassen (GK1-4) für Wohngebäude und deren Beschreibung nach deutscher Musterbauordnung sowie jeweils ein Beispielgebäude aufgeführt. Häuser der Gebäudeklasse 5 und Sonderbauten, wie Hochhäuser sowie Büro- und Verwaltungsgebäude, werden hierbei nicht betrachtet. Die in Tab. 8 genannten Gebäudehöhen beziehen sich auf das Maß zwischen mittlerer Geländeoberkante und der Fußbodenkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist. Die ausgewählten Beispielgebäude stellen typische Häuser der jeweiligen Gebäudeklasse dar. Das GK1-Gebäude ist das Demonstrationsgebäude in Kassel, ein freistehendes Wohnhaus mit zwei Wohneinheiten. Das GK2-Gebäude ist ein Reihenhaus mit einer Nutzungseinheit. Für das Beispielgebäude der Gebäudeklasse 3 wird ein typisches zweispänniges Mehrfamilienhaus mit drei Vollgeschossen gewählt, das häufig in größeren Städten beispielsweise mit Blockrandbebauung zu finden ist. Bei dem GK4-Gebäude handelt es sich um ein mehrgeschossiges Gebäude mit vier Stockwerken, das zumeist in größeren Siedlungsstrukturen vorzufinden ist.

Ziel der Analyse ist es, für die Beispielgebäude ein zentrales Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Kanalführung zu entwickeln, bei dem der Sanierungsaufwand innerhalb der Wohneinheiten minimal ist. Das bedeutet, dass lediglich beim Anschluss der fassadenintegrierten Luftkanäle an die Wohnräume Arbeiten in den Wohnungen anfallen sollten. Die Platzierung des Lüftungsgeräts erfolgt jeweils außerhalb der Wohnung im Dachraum oder im Keller des Gebäudes. Zunächst wird nur eine konzeptionelle Betrachtung der Gebäude für die Anordnung von dämmstoffintegrierten Leitungsführungen auf der Fassade vorgenommen, die dazu dient, die grundsätzlichen Prinzipien zur Verlegung und die einschränkenden Faktoren für die jeweiligen Beispielgebäude der unterschiedlichen Gebäudeklassen zu identifizieren. Von entscheidender Bedeutung ist dabei der Platzbedarf auf der Fassade. Bei der aktuellen Kanalplattengeometrie sind die 300 mm breiten und 30 mm tiefen Lüftungskanäle in handelsüblichen Hartschaumplatten mit den Abmaßen von 1.000 mm x 500 mm bei einer Plattendicke von 160 mm integriert. Der freie Lüftungsquerschnitt reicht aus, um entweder einen oder zwei Räume an das Luftkanalnetz anzuschließen. Bei der gemeinsamen Nutzung eines Kanals für zwei Räume von unterschiedlichen Wohnungen sind je nach Gebäudeklasse verschiedene brandschutztechnische Maßnahmen zu ergreifen, um die Rauch- und Brandweiterleitung zwischen den Wohneinheiten zu unterbinden. Wird der Lüftungskanal in unmittelbarer Nähe des Außenfensters geführt und mit dem Innenraum verbunden, so ist ein ausreichender Abstand zur Fensterlaibung einzuhalten, um eine passgenaue Verbindung mit einer Kernbohrung zu erreichen.

Tab. 8: Wohngebäudeklassen nach deutscher Musterbauordnung (MBO) mit typischen Gebäuden

Gebäudeklasse	Beschreibung	Beispielgebäude
GK1	Freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ²	
GK2	Nicht freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ²	
GK3	Sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m	
GK4	Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m ²	

Höhe ist hier das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel.

Grundflächen der Nutzungseinheiten sind jeweils die Brutto-Grundflächen, Flächen in Kellergeschossen bleiben außer Betracht.

6.3.1 Fassadengestaltung und Grundrissanordnung

Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser der Gebäudeklasse 1 sind nahezu frei von baulichen Abhängigkeiten für die Kanalnetzplanung. Prinzipiell stehen alle Fassaden für die Kanalführung zur Verfügung und die Wandabstände zwischen den Fenstern sind in der Regel ausreichend, um eine ausschließlich vertikale Kanalverlegung für den Anschluss aller Räume zu ermöglichen. Die Anordnung des Sammel- und Verteilkanals zum zentralen Lüftungsgerät ist in den meisten Fällen sowohl im Keller als auch im Dachgeschoss realisierbar.

Für Häuser der Gebäudeklasse 2, wie beispielsweise das in Abb. 85 dargestellte Reihenhäuser, stehen meist nur zwei Hauptfassaden für die Verlegung dämmstoffintegrierter Lüftungskanäle zur Verfügung. Die Wandflächen zwischen den Fenstern der Räume sollten daher möglichst platzsparend genutzt werden. Reihenhaussiedlungen sind meistens so ausgerichtet, dass die Sanitärräume und die Küche auf der Vorderseite liegen. Die zur Entlüftung dieser Räume benötigten Leitungen können im Keller einfach zusammengeschlossen und zum Lüftungsgerät zurückgeführt werden. Auf der Rückseite befinden sich vorwiegend Balkone, sodass für die Kanalführung gesonderte Lösungen entwickelt werden müssen.

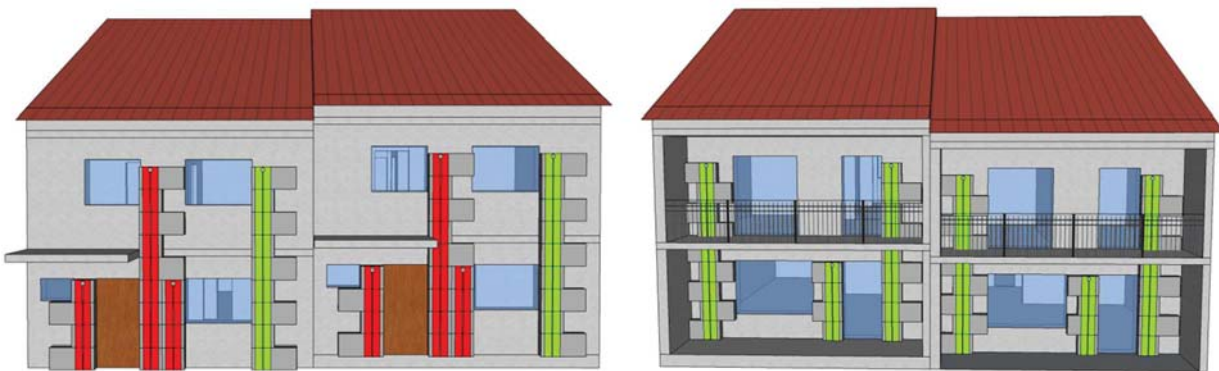


Abb. 85: Vorder- und Rückansicht zweier GK2-Reihenhäuser mit vertikaler Kanalverlegung, Zuluftkanal in Grün und Abluftkanal in Rot

Im Mehrgeschosswohnungsbau, bei GK3- und GK4-Gebäuden, sind größtenteils einfache Grundrisse mit zentralen Fluren in den Wohneinheiten vorhanden. Dies führt dazu, dass bei der Planung der Lüftungsbereiche eine klare Unterteilung in Zuluft- und Abluftbereiche möglich ist. Quaderförmige Baukörper und einfache Kubaturen vereinfachen die Planung der Kanalleitungsführung. Doch gerade in mehrgeschossigen Gebäuden schränkt die Lage der anschließenden Innenwände die Kanalführung auf der Fassade weiter ein, sodass lediglich der Abstand zwischen Fensterlaibung und Innenwand für die vertikalen Leitungen verwendet werden kann. In Abb. 86 ist die Vorderansicht des GK3-Gebäudes mit den in Rot gekennzeichneten Innenwänden und dem Regelgrundriss des Gebäudes (Zulufräume in Grün, Ablufträume in Rot) dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Wandabstand zwischen Fenster und Innenwand insbesondere in den Küchen und Bädern sehr schmal ist, weshalb ein Anschluss aller Räume der drei Geschosse über einen einzelnen senkrechten 300 mm breiten Flachkanal nur schwer zu realisieren ist. Lösungsansätze zu dieser Problematik werden in Kapitel 6.4 vorgestellt.

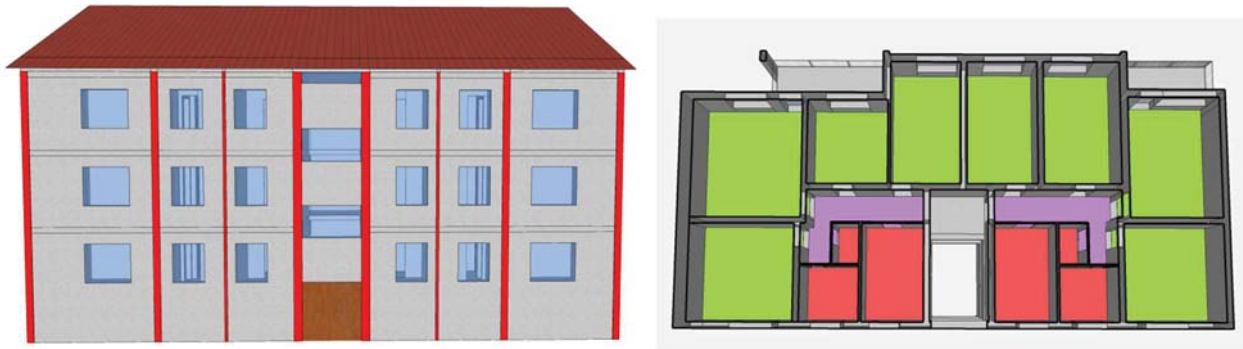


Abb. 86: Vorderansicht des GK3-Gebäudes mit den an die Außenwände angrenzenden Innenwänden in Rot (links) und der dazugehörige Grundrissplan (rechts)

6.3.2 Loggien und Balkone

Wohngebäude der Wiederaufbaujahre weisen selten Erker oder Rücksprünge auf der Fassade auf, allerdings findet man häufig Balkone und Loggien vor. Räume, die keinen balkonfreien Außenwandanteil haben, können ohne Umlenkung oftmals nicht mit einem vertikalen Kanal erschlossen werden. Einfache Lösungsmöglichkeiten zur Integration der Kanäle in die Fassade gibt es bei auskragenden Balkonen beispielsweise dann, wenn im Zuge der energetischen Sanierung die alten Balkone abgetrennt und durch neue, thermisch getrennte Vorbauten ersetzt werden.

6.3.3 Brandschutzanforderungen

Bei der Planung von fassadenintegrierten Luftkanalsystemen sind die geltenden Anforderungen an den Brandschutz zu beachten. Im Sinne der Musterbauordnung, nach § 28 Abs. 1, müssen Außenwände und Außenwandbauteile so ausgeführt werden, „*dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist*“. Für Gebäude der Gebäudeklasse 1 bis 3 können Fassadensysteme aus normalentflammaren Baustoffen (B2) verwendet werden. Bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 muss das Fassadenmaterial schwerentflammbar (B1) sein. Wärmedämmverbund-Systeme werden gemäß Musterbauordnung § 28 Abs. 3 als Oberfläche von Außenwänden bzw. als Außenwandbekleidung angesehen und sind „*einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktion schwerentflammbar*“ auszuführen. Durch den Einsatz von chemischen Zusätzen, wie Flammschutzmittel, kann das Brandverhalten von expandiertem Polystyrol (EPS) so begünstigt werden, dass der Baustoff als schwerentflammbar eingestuft wird. In den Verwendbarkeitsnachweisen der WDVS-Hersteller werden Wärmedämmverbund-Systeme aus schwerentflammbarem EPS-Hartschaum bis zu einer Dämmstoffschicht von 100 mm als schwerentflammbar klassifiziert [Kotthoff 2009]. Dickere Systemaufbauten (Dämmstoffdicke ≥ 100 mm), wie sie aufgrund der verschärften Wärmeschutzanforderungen bei der Sanierung von Gebäudefassaden zunehmend eingebaut werden, benötigen zum Erhalt der Schwerentflammbarkeit zusätzliche Brandschutzmaßnahmen. In [Kotthoff 2009] werden zwei gleichwertige Maßnahmen vorgestellt, die im Falle eines Brandes den Brandüberschlag auf das darüberliegende Geschoss ausreichend lange verhindern sollen. So kann ein horizontal umlaufender Brandriegel aus nichtbrennbarem Material, wie beispielsweise Mineralwolle, mit einer Mindestdicke von 200 mm über jedem zweiten Geschoss angeordnet werden, alternativ kann ein sogenannter Sturzschutz über jeder Fensteröffnung verwendet werden. Der Sturzschutz

muss mindestens 300 mm auf beiden Seiten des Fensters überstehen, um einer geschossübergreifenden Ausbreitung des Brandes vorzubeugen. In Abb. 87 sind die beiden zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen am Beispiel der Vorderfassade des GK4-Gebäudes aufgetragen.



Abb. 87: Zusätzliche Brandschutzmaßnahmen für das GK4-Gebäude mit Brandriegel (oben) und Sturzschutz über jeder Fensteröffnung (unten), siehe auch [Ziegler und Krause 2014]

Die zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen haben Auswirkungen auf die Planung der fassadenintegrierten Luftkanalführung. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle dürfen die Schutzfunktion des Brandriegels und des Sturzschutzes nicht vermindern oder umgehen. Ein vertikales Durchstoßen des Brandriegels ist ohne Weiteres nicht möglich. Insbesondere beim Sturzschutz werden die verfügbaren Wandflächen zwischen den Fenstern durch den überstehenden Dämmriegel aus nichtbrennbarem Material stark eingeschränkt, sodass eine ausschließlich vertikale Verlegung der Lüftungskanäle nicht umzusetzen ist.

6.4 Lösungsansätze für die Luftkanalführung

Die verfügbaren Außenwandflächen zwischen den Fenstern, Loggien und Balkonen auf der Hinterfront sowie die notwendigen zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 stellen für die Planung von fassadenintegrierten Luftkanalsystemen einschränkende Faktoren dar. Im folgenden Abschnitt werden für diese baulichen Abhängigkeiten anhand der Beispielgebäude aus Kapitel 6.3 Lösungen erarbeitet. Im Mehrgeschosswohnungsbau sind die Wandabstände zwischen den Fenstern meist nicht breit genug, um eine reine vertikale Kanalführung zur Versorgung jedes einzelnen Raumes mit je einem Lüftungskanal zu ermöglichen. In Abb. 88 sind für die Vorderansicht des Beispielgebäudes der Gebäude-

Klasse 3 zwei verschiedene Luftkanalausführungen aufgezeigt. Die Zuluftkanäle sind jeweils in Grün dargestellt und die Leitungen für die Ablufträume sind Rot eingefärbt.

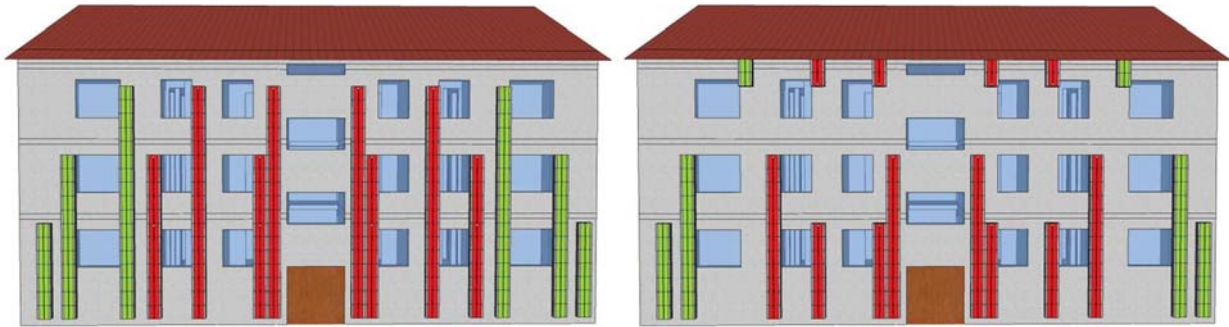


Abb. 88: Lösung für die Kanalführung auf der Fassade bei begrenztem Platzangebot zwischen den Fenstern am Beispiel des GK3-Gebäudes: Anschluss zweier Räume mit einem Luftkanal (links) und Aufteilung der Luftkanäle mit Anschluss über den Keller und den Dachboden (rechts)

Die erste Lösungsmöglichkeit sieht den Anschluss zweier Räume unterschiedlicher Wohneinheiten mit einem einzigen Luftkanal vor. Dazu wird der Luftkanal jeweils im Erdgeschoss und 1. OG angezapft und die anliegenden Räume mit Frischluft versorgt. Der Vorteil dieser Verlegung ist, dass alle luftführenden Kanäle zu einer zentralen Lüftungsanlage im Keller führen und keine weiteren Räumlichkeiten für die Lüftungstechnik vorgesehen werden müssen. Ein Nachteil dieser Anschlussart ist allerdings, dass eine individuelle Regelung der Luftmengen für beide Wohnungen nur mit erhöhtem Aufwand durchführbar ist. Des Weiteren muss die Rauch- und Brandweiterleitung von einer Nutzungseinheit in die nächste verhindert werden. Eine mögliche Lösung hierfür wäre der Einsatz von wartungsfreien Rauch- und Brandschutzklappen an den Wanddurchführungen zu den Räumen.

Bei der zweiten Lösungsmöglichkeit werden die Kanäle für die oberen und unteren Wohneinheiten getrennt voneinander über das Dachgeschoss und den Keller geführt. Vorteil dieser Verlegungsart ist, dass die Kanallängen auf der Fassade im Vergleich zu einem Anschluss nur über den Keller deutlich reduziert werden können. Grundvoraussetzung für diese Option ist ein nicht ausgebautes zugängliches Dachgeschoss sowie ein freier Raum im Keller für die Installation von je einer Lüftungszentrale. Ein weiterer Vorteil ist, dass ein Brandriegel aus nichtbrennbarem Material, wie er bei mehrgeschossigen Gebäuden zum Einsatz kommt, für diese Verlegungsart nicht durchbrochen werden muss.

Loggien und rückgesetzte Balkone erschweren die Kanalverlegung auf der Fassade, da Räume hinter den Balkonen nicht auf direktem Wege an das Kanalnetz angeschlossen werden können. Durch die Nutzung der seitlichen Balkonwände erhöhen sich die zur Verfügung stehenden Wandflächen zur Anordnung der Lüftungsleitungen. Dazu müssen allerdings die Balkonplatten punktuell durchstoßen werden. In Abb. 89 sind zwei Möglichkeiten für die Verlegung der Luftkanäle dargestellt. Im linken Bild ist eine Variante zu sehen, bei der die Räume der unteren beiden Geschosse jeweils mit einem Kanal versorgt werden. Im rechten Bild ist die Kanalführung dargestellt, wenn die Luftkanäle getrennt über den Keller und den Dachboden durchgeführt werden. Auch hier ist zu sehen, dass durch die Trennung der Geschosse weniger Kanäle in der Fassadenebene benötigt werden, als beim Anschluss aller Luftleitungen über den Keller mit gemeinsamer Nutzung zweier Räume pro Kanal.

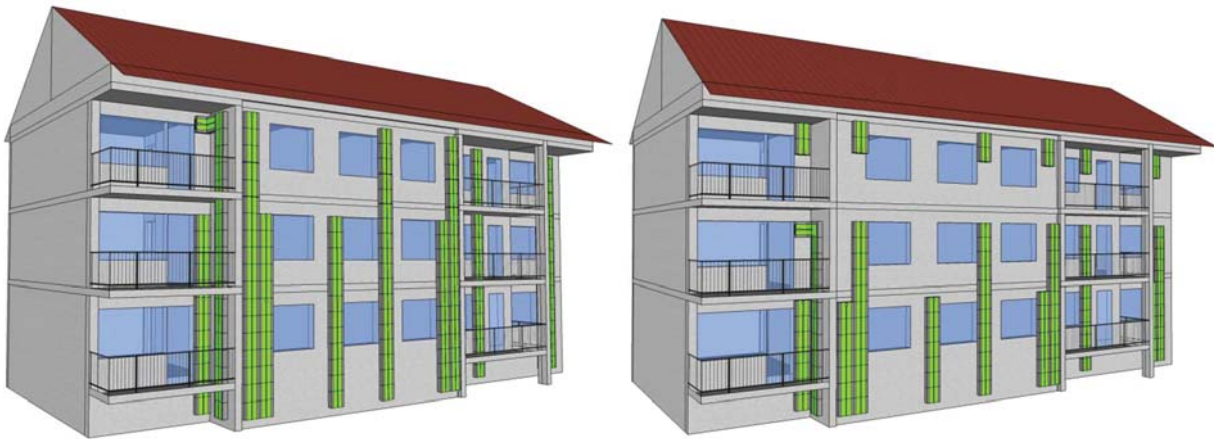


Abb. 89: Lösung für die Kanalführung bei rückgesetzten Balkonen mit auskragender Balkonplatte durch Nutzung der seitlichen Balkonwände für die Kanalverlegung, links: ein Kanal für zwei Räume, rechts: Trennung der Geschosse

Bei sehr beengten Platzverhältnissen auf der Fassade, wie beispielsweise großen Mehrfamilienhäusern, bietet es sich an, einen Teil der Luftkanalführung innerhalb des Gebäudes zu verlegen, sofern die dafür notwendigen Umbaumaßnahmen gering sind. Hierfür kommen Schachtsysteme infrage, falls sie nach Änderung des Heizungsanlagensystems nicht mehr verwendet werden. In vielen Gebäuden der 1950er bis 1970er Jahre sind stillgelegte Schächte und Schornsteine zu finden, die früher für Gasheizöfen genutzt wurden. Durch spätere Modernisierungen und die Installation von wohnungs- oder gebäudezentralen Heizungsanlagen stehen diese leer, vorausgesetzt sie werden nicht für Einzelfeuerstätten wie bzw. Kamine genutzt. In den Grundrissplänen bestehender Mehrgeschosswohnungsbauten liegen Bäder und Küchen zumeist direkt nebeneinander und können so gemeinsam über den bestehenden Schacht entlüftet werden. Dazu besteht die Möglichkeit, flexible Metallschläuche in den Schächten einzubringen, die je für eine Wohnung genutzt werden, sodass keine Brandschutzklappen in den Schächten oder den Wohnungen benötigt werden. Diese können bei der Zusammenführung der Abluftkanäle an zentraler Stelle angeordnet werden. In einem bestehenden Schornstein mit einem freien Querschnitt von typischerweise 200 mm x 200 mm können so problemlos vier Rohre mit einem Nenndurchmesser von DN80 platziert werden. Ein grundsätzliches Schema für diese Art der Abluftführung ist in Abb. 90 dargestellt. Hier sind je zwei Schächte zu sehen, die an die Trennwand zwischen Küche und Bad grenzen. In beiden Schornsteinen werden je vier flexible Metallkanäle eingezogen, die einen Raum pro Geschoss entlüften. Das Einsetzen der Rohre kann im Keller oder Dachboden vorgenommen werden und erfordert bis auf den Anschluss zu den Räumen keinen weiteren Sanierungsaufwand in den einzelnen Wohnungen. Insbesondere bei knappen Platzverhältnissen auf der Fassade bietet sich diese Art der Abluftkanalführung in den Schächten an.

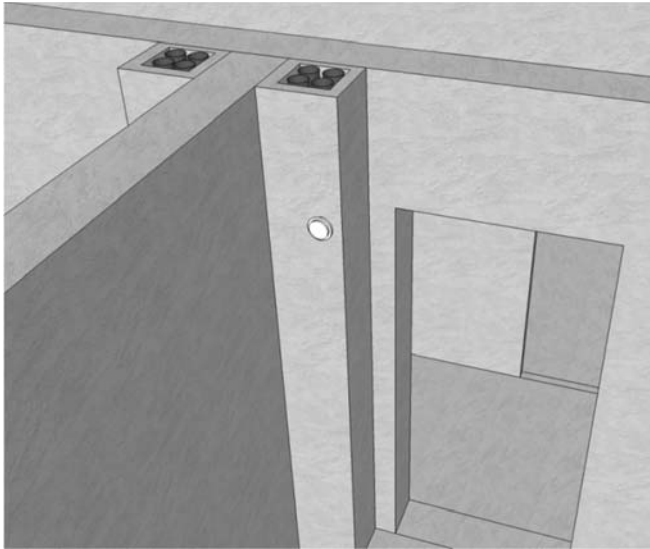


Abb. 90: Nachträgliche Nutzung stillgelegter Schächte für die Abluftkanalführung in Küchen und Bädern

Zusätzliche Brandschutzmaßnahmen im Fassadenbereich für Gebäude der Gebäudeklasse 4 wirken sich auf die Kanalführung mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen aus. Diese Brandschutzmaßnahmen in Form eines umlaufenden Brandriegels oder eines Sturzschutzes über jeder Fensteröffnung sind zum Erhalt der Schwerentflammbarkeit von WDVS mit einer Dämmstoffstärke über 100 mm anzuwenden. Der Brandriegel wird hierbei aus nichtbrennbarem Material ausgeführt und begrenzt den Brand in der Dämmebene jedes zweiten Geschosses. In Abb. 91 und Abb. 92 sind zwei verschiedene Lösungsmöglichkeiten für die Luftkanalführung über die Fassade zu sehen. Der Brandriegel befindet sich in beiden Fällen zwischen dem zweiten und dritten Obergeschoss und wird durch die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle nicht durchbrochen. Der Anschluss der Kanäle in das Innere des Gebäudes erfolgt getrennt über die Sockelwand an das Kellergeschoss und über den Kniestock in den Dachraum. Für das Gebäude werden somit mindestens zwei Lüftungsanlagen benötigt, die entsprechend je zwei Geschosse des Gebäudes versorgen.

In Abb. 91 ist eine Lösungsmöglichkeit für die Anordnung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle auf der Fassade dargestellt. Die Zuluftleitungen sind in Grün und die Abluftleitungen in Rot eingefärbt. Die senkrecht verlaufenden Kanäle binden immer zwei übereinanderliegende Räume an das Kanalnetz. Hier sind jeweils an der Verbindungsstelle zwischen fassadenintegriertem Lüftungskanal und dem Raumeinlass Brandschutzklappen zu installieren, um den Rauch- und Brandüberschlag in die nächstgelegene Wohneinheit zu unterbinden. Der Verlegungsaufwand dieser Kanalführungsart ist allerdings sehr hoch und eine individuelle Dosierung der Luftmengen in den Räumen des gleichen Lüftungsstrangs ist nur in Abhängigkeit des anderen angeschlossenen Raums möglich.



Abb. 91: Lösung für die Luftkanalführung für GK4-Gebäude bei Anordnung eines umlaufenden Brandriegels mit fassadenintegrierter Zu- und Abluftkanalführung und Nutzung eines Luftkanals für zwei übereinanderliegende Räume, Anschluss zweier Geschosse über den Dachboden und den Keller

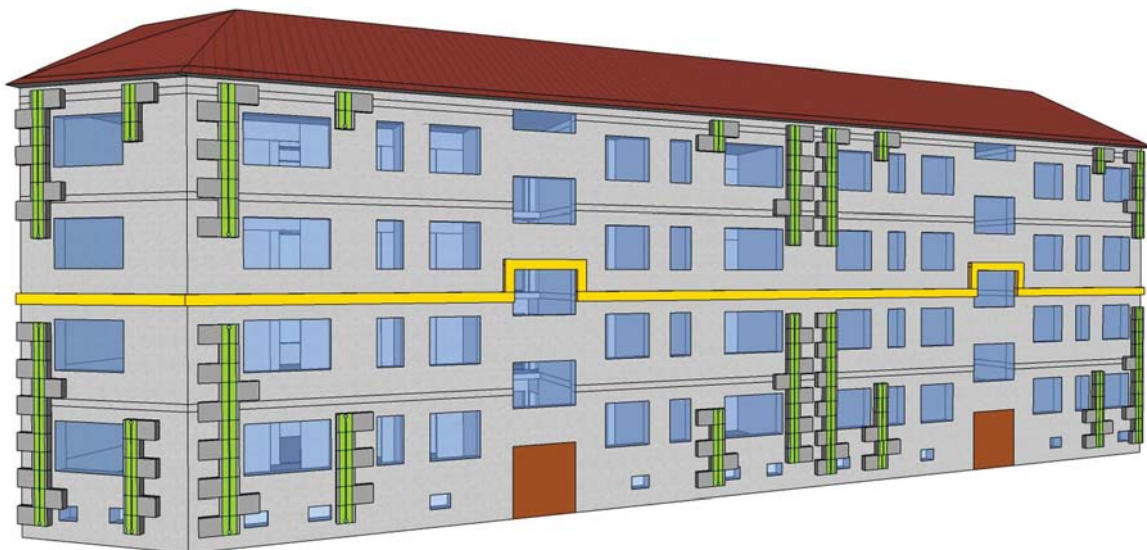


Abb. 92: Lösung für die Luftkanalführung für GK4-Gebäude bei Anordnung eines umlaufenden Brandriegels mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung und Abluftkanalführung über bestehende Schachtsysteme, Anschluss zweier Geschosse über den Dachboden und den Keller

Für den Fall, dass jeder Raum einzeln über einen Lüftungskanal an das Luftkanalnetz angeschlossen werden soll, stellt Abb. 92 eine weitere Lösungsmöglichkeit für die Erschließung der Räume der Hausvorderseite des Gebäudes mit fassadenintegrierten Luftkanälen dar. Voraussetzung hierfür sind nicht genutzte und erschließbare Schächte zur Versorgung der Ablufträume. Die hier dargestellten dämmstoffintegrierten vertikalen Lüftungskanäle versorgen je einen Zulufttraum des Gebäudes. Bei den Räumen links und rechts der beiden Treppenhäuser handelt es sich um Bäder und Küchen, also um Ablufträume, die über die ungenutzten Schächte entlüftet werden. Der Leitungsbedarf auf der Fassade ist für diese Verlegungsart im Vergleich zur ersten Variante deutlich geringer und Schotts zur Verhinderung der Rauch- und

Brandweiterleitung können an zentraler Stelle im zugänglichen Dachboden oder Keller angeordnet werden.

Die beiden vorgestellten Lösungsansätze für die fassadenintegrierte Luftkanalführung sind so konzipiert, dass der umlaufende Brandriegel zwischen dem zweiten und dritten Geschoss nicht durchstoßen werden muss. Soll die Anbindung aller Geschosse des Gebäudes an ein Lüftungsgerät im Keller oder Dachraum erfolgen, so kann ein Durchdringen des Brandriegels durch die Lüftungsleitung nicht verhindert werden. Ein durchaus vielversprechender Ansatz für die Durchführung ist die Ausführung des Lüftungskanals im Bereich des Brandriegels aus nichtbrennbaren Stoffen, wie beispielsweise aus Blech. Eine im Brandfall aufschäumende Beschichtung aus intumeszierendem Material verschließt dann den Kanal vollständig. Das grundsätzliche Prinzip dieser Ausführung ist in Abb. 93 wiedergegeben. Hier ist zudem ein Gitter im Lüftungsquerschnitt zu sehen, das in den Kanal eingesetzt wird und so die Oberfläche des beschichteten Kanals erhöht. Eine vergleichbare Ausführung der Abschottung des geschossübergreifenden Hohlraums wird in [Peikos 2013] vorgestellt. Für beide Systeme ist die Funktionsweise der Brandriegeldurchführung für eine spätere Zulassung des Systems noch in einem entsprechenden Messaufbau zu überprüfen.

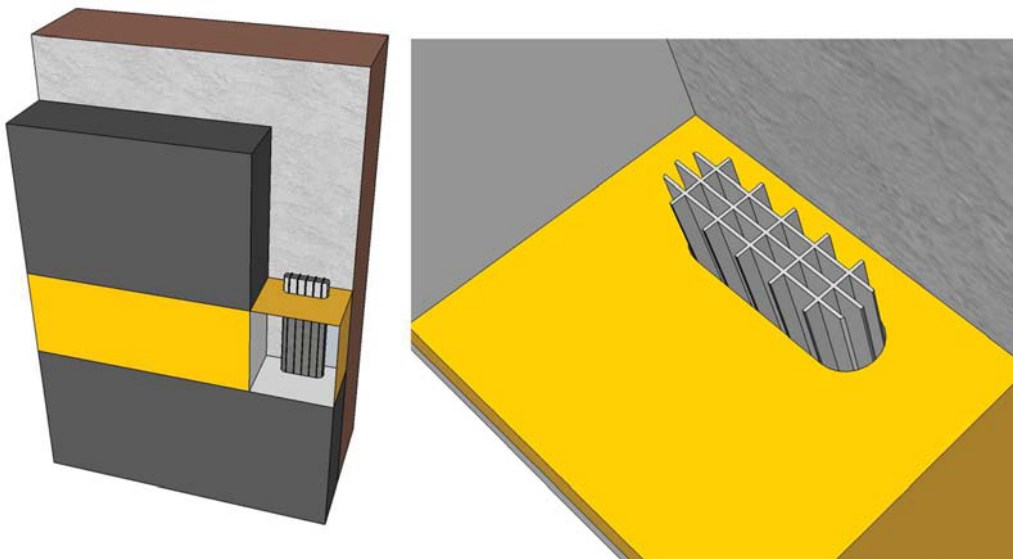


Abb. 93: Brandriegeldurchführung mit Lüftungskanal aus nichtbrennbarem Material und zusätzlich eingeschobenes Gitter mit intumeszierender Beschichtung

6.5 Zusammenfassende Bewertung

Die Luftkanalführung in der Fassadenebene lässt sich für Ein- und Zweifamilienhäuser leicht realisieren, da genügend Außenwandflächen für die Anordnung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle zur Verfügung stehen. In diesem Kapitel wird analysiert, inwieweit das Sanierungssystem auch auf größere Wohngebäude übertragen werden kann. Bauliche Abhängigkeiten und die brandschutztechnischen Anforderungen sorgen dafür, dass für Mehrfamilienhäuser gesonderte Lösungen für die Konzeptionierung der Luftkanalführung entwickelt werden müssen.

Ausgehend von der deutschen Gebäudetypologie werden zunächst die Potentiale für unterschiedliche Gebäudetypen dargestellt. Eine Analyse des deutschen Wohngebäudebestands zeigt, dass insbesondere Mehrfamilienhäuser der 1950er bis 1970er Jahre, aufgrund der hohen spezifischen Energiebedarfe, für die energetische Sanierung der Außenfassade geeignet sind. Diese Gebäude weisen im Ausgangszustand hohe Energiebedarfe auf und die meist schlichten Putzfassaden können ohne Denkmalschutzauflagen mit WDV-Systemen ertüchtigt werden. Zur Identifizierung der einschränkenden Faktoren für die Luftkanalführung werden vier Beispielgebäude der Gebäudeklassen 1-4 gemäß der deutschen Musterbauordnung verwendet. Die baulichen Abhängigkeiten und die dafür entwickelten Lösungen werden nachfolgend dargestellt.

Hierbei zeigt sich, dass die Außenwandflächen zwischen den Fenstern in Mehrfamilienhäusern in vielen Fällen nicht ausreichend sind, um eine ausschließlich vertikale Kanalführung mit einem eigenen Kanal für jeden Raum zu ermöglichen. Ein Lösungsansatz sieht vor, die Luftkanalführung für verschiedene Geschosse getrennt über den Dachboden und den Keller zu führen, sodass sich die Kanalleitungslänge reduziert und eine flexiblere Verlegung ermöglicht wird. Die Nutzung eines vertikalen Kanals für zwei übereinanderliegende Räume stellt eine platzsparende Alternative dar. Die Rauch- und Brandweiterleitung muss in diesem Fall mithilfe von Brandschutzklappen verhindert werden.

Loggien und auskragende Balkone erschweren die Verlegung der Lüftungskanäle. Ein punktuell durchstoßen der Balkonplatte oder die Anordnung der Kanäle auf den seitlichen Wänden sind Varianten, um die Räume an das Kanalnetz anzuschließen. Ein Teil der Luftkanalführung kann bei vielen älteren Gebäuden auch über stillgelegte Schächte realisiert werden. Eine Möglichkeit der Erschließung ist das Einziehen von flexiblen Rohren in die Schornsteine.

Bei Gebäuden der GK-4 werden für WDV-Systeme mit einer Dämmschichtstärke über 100 mm aus Gründen des Brandschutzes zusätzliche Maßnahmen in Form eines Brandriegels oder Sturzsches über jedem Fenster gefordert. Ein Durchdringen des Brandriegels mit einem Lüftungskanal aus nichtbrennbarem Material und zusätzlicher intumeszierender Beschichtung, der im Brandfall den Kanal ausschäumt, stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Die Funktionsweise eines solchen Systems ist allerdings noch über einen Brandversuch zu überprüfen.

Die in diesem Abschnitt entwickelten Lösungen für typische mehrgeschossige Wohngebäude liefern wichtige Hinweise und Planungsempfehlungen für die Luftkanalführung mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen. Aufgrund unterschiedlicher Fassadengestaltung, der Balkon- und Loggienanordnung sowie der individuellen Aufteilung der Wohnräume muss für jedes Gebäude eine detaillierte Konzeptionierung der Zu- und Abluftkanäle individuell geplant werden.

7 Anwendungen im Wohngebäudebestand

7.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die in Kapitel 5 entwickelte Methodik zur gesamtenergetischen Bilanzierung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung wird in diesem Abschnitt an zwei Wohngebäuden angewendet. Ziel ist es, am Beispiel von zwei Gebäuden der Gebäudeklasse 1 und 4 die Leistungsfähigkeit eines Fassadensanierungssystems mit dämmstoffintegrierter Luftkanalführung zu bestimmen und mit herkömmlichen Systemen, wie beispielsweise innenliegenden Lüftungssystemen, energetisch und hydraulisch zu vergleichen.

Zunächst werden die Gebäude und die untersuchten Lüftungssysteme detailliert beschrieben und die Randbedingungen der Untersuchung erläutert. Bei den ausgewählten Gebäuden handelt es sich um das Zweifamilienhaus in Kassel, auf dessen Betriebsverhalten im Rahmen der messtechnischen Analyse schon ausführlich eingegangen wurde, sowie das Beispielgebäude der Gebäudeklasse 4 aus Kapitel 6.3.

7.2 Anwendung im Zweifamilienhaus (GK1)

Das am Demonstrationsgebäude umgesetzte Lüftungssystem wird zwei Systemen mit jeweils herkömmlicher, im Innenraum verlegter Luftkanalführung gegenübergestellt. Dabei werden die unterschiedlichen Leitungsführungen hinsichtlich des Systemwirkungsgrads mithilfe der gesamtenergetischen Bewertung analysiert und die Investitionskosten sowie die hydraulischen Eigenschaften, wie die Systemdruckverluste und der damit verbundene Hilfsstrombedarf, miteinander verglichen.

7.2.1 Gebäudebeschreibung und untersuchte Lüftungssysteme

Die Beschreibung des Zweifamilienhauses und des Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung erfolgte bereits in den Kapiteln 3.2 und 5.3. Bei den betrachteten Referenzsystemen handelt es sich um zentrale Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung für beide Wohneinheiten, die über eine gemeinsame Zu- und Abluftleitung an das Lüftungszentralgerät angeschlossen sind. Die Auslegung der Luftvolumenströme nach Nennlüftung entspricht der Dimensionierung aus Tab. A 5 im Anhang. Es werden somit dem fassadenintegrierten Lüftungssystem keine bedarfsgeführten Systeme oder reine Abluftanlagen gegenübergestellt. Das Lüftungsgerät befindet sich bei allen untersuchten Anlagen jeweils im gleichen Kellerraum.

Die zwei Referenzsysteme weisen je eine horizontale und eine vertikale Luftkanalverteilung auf und sind in Abb. 94 dargestellt. Die Anordnung der Luftkanäle sind so realisiert, dass möglichst wenige Kanäle in den Innenräumen verlegt werden müssen. Die blauen Kanäle stellen die Zuluftverteilung dar und die gelben Leitungen die Ablufführung. Bei der horizontalen Kanalführung strömt die Frischluft über eine zentrale Leitung im Keller zu einer Steigleitung, an der horizontal jeweils eine Wohnung über je eine Anbindeleitung versorgt wird. Der gesamte Abluftvolumenstrom pro Wohnung wird an der Steigleitung zusammengeführt und zurück zum Lüftungsgerät geleitet. Bei der vertikalen Luftkanalführung werden übereinanderliegende Räume

über eine senkrechte Strangleitung versorgt. Der zentrale Verteil- und Sammelkanal befindet sich im Keller und führt zum Lüftungszentralgerät im Kellerraum.

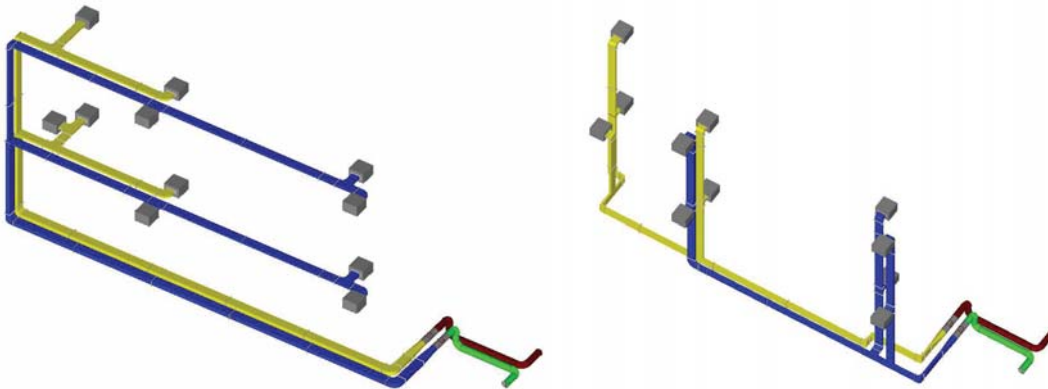


Abb. 94: Referenzsysteme mit innenliegender Luftkanalführung für das Zweifamilienhaus in Kassel mit horizontaler Verteilung (links) und vertikaler Verteilung (rechts)

Die Verteil- und Sammelleitungen im Keller sowie die senkrechten Steigleitungen weisen einen freien Querschnitt von 200 mm x 100 mm auf. Die Querschnitte der Anbindeleitungen in den beiden Wohneinheiten betragen 200 mm x 50 mm und haben damit Abmaße, wie sie in gängigen Flachkanalsystemen im Wohnungsbau eingesetzt werden. Alle Luftleitungen sind aus Blech oder haben einen Rauigkeitswert, der dem von herkömmlichen Blechkanälen ($\varepsilon=0,15$) entspricht. Die Luftkanalführung mit fassadenintegrierten Luftleitungen im Zuluft- und Abluftkanalnetz wird über eine horizontale Verteil- bzw. Sammelleitung mit je einem Querschnitt von 200 mm x 100 mm ermöglicht. Die senkrechten Steigleitungen zur Erschließung der einzelnen Räume weisen eine Abmessung von 30 mm x 300 mm auf (siehe Abb. A 19).

7.2.2 Untersuchungsergebnisse

Hydraulische Verteilung und Druckverluste

Die verschiedenen Luftkanalführungen unterscheiden sich in ihrer Leitungslänge, den Teilluftmengen in den Kanälen sowie der Anzahl und Art der Umlenkungen. Dies führt zu unterschiedlichen Druckverlusten in den einzelnen Zu- und Abluftsträngen und an Einzelwiderständen. Die am Ein- und Auslass der Räume geforderten Volumenströme entsprechen der Auslegung nach [DIN 1946-6] und sind bei allen Varianten gleich hoch. Das Lüftungszentralgerät besitzt zwei baugleiche Ventilatoren zur Druckerhöhung im Zu- und Abluftkanalnetz.

In Tab. 9 sind die statisch berechneten Systemdruckverluste, die elektrische Anschlussleistung beider Lüfter und der über die Betriebszeit der Lüftungsanlage anfallende Hilfsstrombedarf aufgeführt. Der Druckabfall am ungünstigsten Strang, der vom Ventilator zur Förderung des Gesamtvolumenstroms bei Nennlüftung überwunden werden muss, führt bei den Varianten mit innenliegender Kanalführung auf nahezu gleiche Druckverluste im Zuluft- und Abluftkanalnetz und somit zu fast gleichen Anschlussleistungen für die Ventilatoren. Das Kanalnetz mit fassadenintegrierten Luftleitungen verursacht deutlich höhere Druckverluste. Dies ist zum einen auf den Druckabfall an den Einzelwiderständen am Übergang zwischen dem vertikalen Lüftungskanal und dem Raumanschluss zurückzuführen und zum anderen auf den kleineren

Kanalquerschnitt der vertikalen Strangleitungen, die aufgrund der geringen Platzverhältnisse im Außenwandbereich gewählt wurden.

Tab. 9: Vergleich der Systemdruckverluste, der Ventilatoranschlussleistungen und des jährlichen Hilfsstrombedarfs des Lüftungssystems am Zweifamilienhaus in Kassel bei fassadenintegrierter Luftkanalführung und zwei innenliegenden Luftkanalsystemen

Luftkanalführung für das Demonstrationsgebäude	Druckverlust [Pa]		Anschluss- leistung beide Ventilatoren [W] ^a	Energiebedarf Lüftungsanlage [kWh/a] ^b
	Zuluft	Abluft		
fassadenintegriert, vertikale Verteilung	46	61	53,3	271,4
innenliegend, horizontale Verteilung	21	28	28,6	145,4
innenliegend, vertikale Verteilung	19	28	27,3	138,9

^a Ventilatorleistung wird aus Kennlinienfeld bestimmt, ^b Betriebszeit während der Heizperiode

Die elektrische Leistungsaufnahme beider Ventilatoren ist bei fassadenintegrierter Luftführung in etwa doppelt so hoch wie für die innenliegenden Leitungsführungen und führt somit auch zu einem größeren jährlichen Hilfsstrombedarf. Der jährliche Energiebedarf für das am Demonstrationsgebäude umgesetzte Lüftungssystem beträgt 271,4 kWh/a und liegt etwa 86,7 % über dem Bedarf des innenliegenden Systems mit horizontaler Verteilung und ca. 95,4 % über dem System mit vertikaler Luftführung. Stellt man aber die jährlichen Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren den Investitionskosten für die Installation des Luftkanalnetzes gegenüber, so zeigt sich in der Summe ein Kostenvorteil der fassadenintegrierten Luftkanalführung im Vergleich zur Verlegung der Luftleitungen im Inneren des Gebäudes.

Gesamtenergetische Bilanzierung

Die Art der Leitungsführung beeinflusst das thermische und energetische Verhalten der untersuchten Lüftungssysteme. Die Wärmeverluste über die im unbeheizten Keller verlegten Luftleitungen bei der horizontalen und vertikalen Kanalführung der beiden Referenzsysteme wirken sich im Vergleich zur fassadenintegrierten Luftkanalführung unterschiedlich auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes und den Systemwirkungsgrad des Lüftungssystems aus.

Die Wärmeenergie, die über den Wärmetauscher zurückgeführt wird, und die Wärmeverluste über das Luftkanalnetz beider Referenzsysteme werden mithilfe des instationären Durchflussmodellansatzes der Methodik aus Kapitel 5.4.1 berechnet. Die Umgebungstemperatur im Keller wird entsprechend dem simulierten jährlichen Temperaturverlauf der Kellertemperatur aus dem Gebäudesimulationsmodell angesetzt und die Außenlufttemperatur wird dem Klimadatensatz der TRY-Region 07 entnommen. Für die Eintrittstemperatur in den Abluftkanal wird die durchschnittliche berechnete Raumlufttemperatur der Ablufträume des Gebäudes verwendet und der Wärmeübertrager des Lüftungszentralgeräts weist mit 90 % den gleichen Wärmerückgewinnungsgrad auf wie bei den dynamischen Simulationen in Kapitel 5.5. Die im Keller verlegten zentralen Verteil- und Sammelkanäle mit einem Querschnitt von 200 mm x 100 mm werden nach den Empfehlungswerten aus DIN 1946-6 mit einer 25 mm starken Dämmschicht der WLG 045 (entspricht einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,045 \text{ W/(mK)}$) versehen. Alle Lüftungskanäle innerhalb der beiden Wohnungen werden ohne zusätzliche Wärmedämmschicht ausgeführt. Der

berechnete Heizwärmebedarf des sanierten Gebäudes mit fassadenintegrierter Luftkanalführung wird dem Energiebedarf des Gebäudes bei Ausführung eines innenverlegten Lüftungssystems mit horizontaler und vertikaler Leitungsführung gegenübergestellt. Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung sind in Abb. 95 dargestellt. Aus der Grafik ist zu entnehmen, dass der simulierte jährliche Heizwärmebedarf des Zweifamilienhauses bei innenliegender Kanalführung etwas geringer ist als bei der umgesetzten fassadenintegrierten Luftkanalführung.

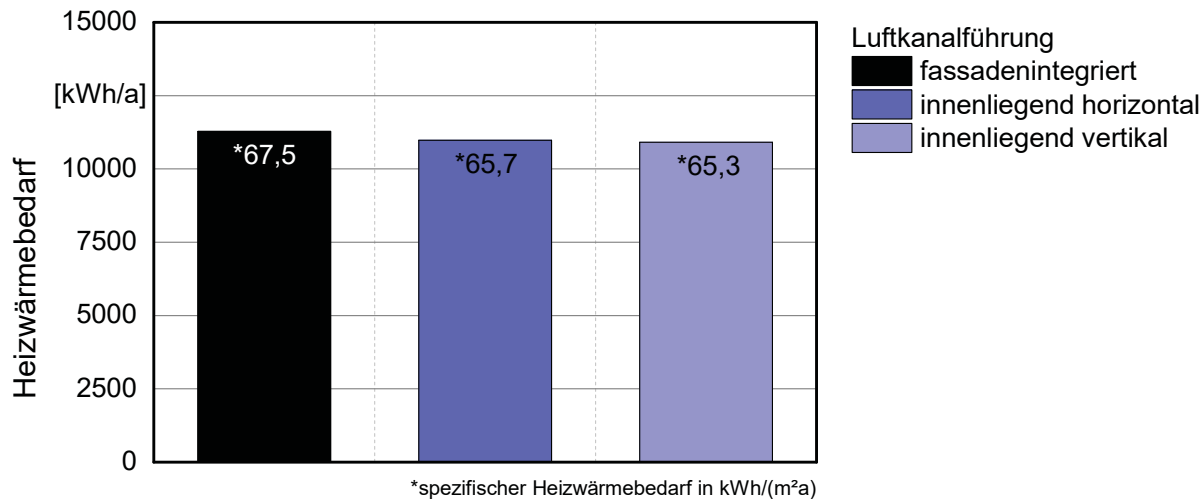


Abb. 95: Vergleich der Heizwärmebedarfe des sanierten Gebäudes ohne Austausch der Fenster bei fassadenintegrierter Luftkanalführung und innenliegender Kanalführung mit horizontaler bzw. vertikaler Verteilung

Der jährliche spezifische Heizwärmebedarf bei Ausführung eines im Gebäude verlegten Luftkanalnetzes mit horizontaler Verteilung beträgt 65,7 kWh/(m²a) und liegt etwa 2,7 % unter dem Energiebedarf mit dämmstoffintegrierter Luftkanalführung in der Fassade. Mit vertikaler innenliegender Verteilung berechnet sich der spezifische Heizwärmebedarf auf 65,3 kWh/(m²a). Dies bedeutet eine Reduzierung im Vergleich zur fassadengeführten Leitungsführung von ca. 3,3 %. Der geringere Energiebedarf ist auf die niedrigeren Wärmeverluste über die im Inneren des Gebäudes und im unbeheizten Keller verlegten Luftkanäle zurückzuführen. Eine Gegenüberstellung der jährlichen Wärmeverluste über das Zu- und Abluftkanalnetz und der am Wärmeübertrager zurückgewonnenen Energie aller untersuchten Luftkanalsysteme ist in Abb. 96 zu sehen.

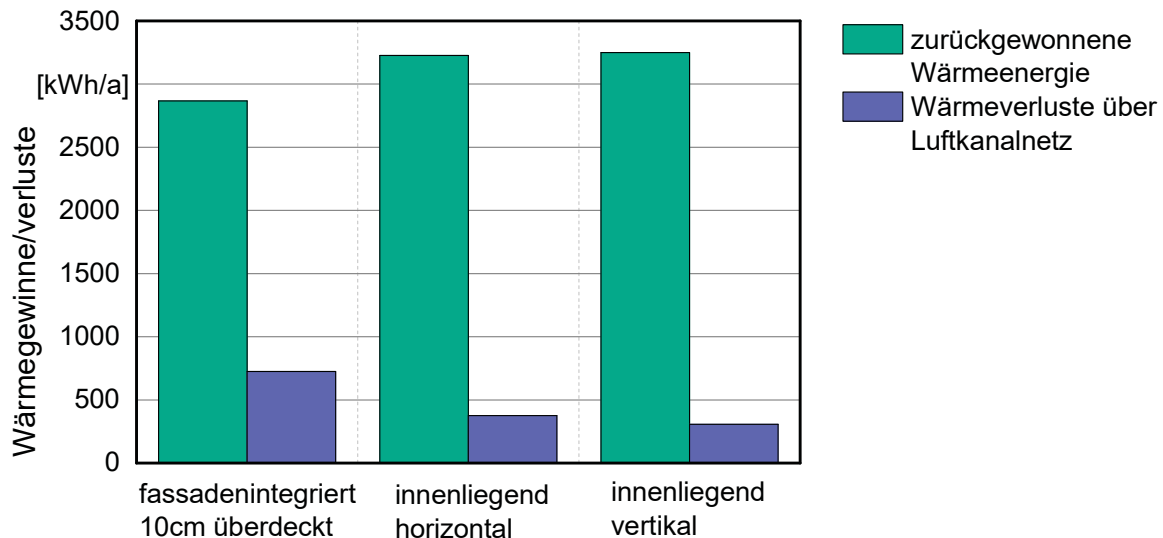


Abb. 96: Vergleich der jährlich am Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts zurückgewonnenen Wärmeenergie und der Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes des sanierten Gebäudes ohne Fensteraustausch mit fassadenintegrierter Luftkanalführung und innenliegender horizontaler und vertikaler Kanalführung

Hier ist zu erkennen, dass die jährlich dem Gebäude zurückgeführte Wärmeenergie durch das Lüftungsgerät bei der innenliegenden Kanalführung höher ist als bei fassadenintegrierter Luftkanalführung. Die über das Luftkanalnetz verursachten jährlichen Wärmeverluste betragen bei der fassadenintegrierten Leitungsführung 725 kWh/a und verringern sich bei innenliegender horizontaler Verteilung um 48 % auf 376 kWh/a. Für die innenliegende vertikale Leitungsführung ergeben sich jährliche Wärmeverluste über die im Keller verlegten Lüftungskanäle von 308 kWh/a, was einer Minderung um 58 % im Vergleich zur fassadenintegrierten Kanalführung entspricht. Aus den Ergebnissen der oben dargestellten Untersuchung kann für die Lüftungssysteme mit innenliegender Kanalführung der systembezogene Wirkungsgrad nach Formel (5.27) ermittelt werden. Für die horizontale Luftverteilung beträgt der Systemwirkungsgrad 81,5 % und für die vertikale Verteilung 82,9 %

Die im Dämmstoff verlegten Luftkanäle führen je nach Kanallufttemperatur zu einer erhöhten oder geminderten Wärmestromdichte nach außen. Der in Kapitel 3.4.4 bestimmte Wärmebrückenverlustkoeffizient für die Anordnung der vertikalen fassadenintegrierten Lüftungskanäle beträgt bei Nennlüftung 0,04 W/(mK). Der Wärmedurchgangskoeffizient der gedämmten Außenwand weist einen U-Wert von 0,17 W/(m²K) auf und ändert sich unter Einbeziehung des ψ -Werts des 60 m langen Kanals auf der Fassade auf 0,18 W/m²K. Dies entspricht einer Verschlechterung der wärmetechnischen Qualität der Außenwand von etwa 6,4 %. Wird der zusätzliche Wärmeverlust der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung auf die gesamte wärmeübertragende Hüllfläche des Gebäudes bezogen, so erhöht sich der spezifische Transmissionswärmetransferkoeffizient H'_{T} von 0,377 W/m²K auf 0,382 W/m²K, was einer Änderung von etwa 1,3 % entspricht.

Investitionskosten

Die Kosten für die Installation einer innenliegenden Luftkanalführung mit einem gängigen Flachkanalsystem, wie sie in Abb. 94 zu sehen ist, werden für eine horizontale und vertikale Luftverteilung berechnet und führen in beiden Fällen auf Werte von etwa 7.000 Euro. Das Lüftungszentralgerät und die im Kellerraum verbauten Rohrleitungen sind darin noch nicht enthalten, da sie für alle Varianten benötigt werden. Zusätzlich sind für die beiden Referenzsysteme horizontale und vertikale Durchbrüche zwischen den Räumen und Geschossen sowie eine Verkleidung der Luftkanäle an den Raumdecken und Wänden aus gestalterischen Gründen notwendig, die zu weiteren Mehrkosten für den Einbau des Lüftungssystems führen.

Die Dämmplatten mit den integrierten Lüftungskanälen wurden für das Demonstrationsgebäude durch ein Heißdrahtschnittverfahren hergestellt. Die daraus entstehenden Mehrkosten für die Einzelplatte können nach Herstellerangaben mit etwa 50 % angesetzt werden. Für die gesamte Außenfassade beziffern sich die Mehrkosten für das Wärmedämmverbund-System im Vergleich zu einer herkömmlichen Sanierung ohne dämmstoffintegrierte Luftführung auf etwa 2.000 Euro. Die Kostenersparnis für die energetische Sanierung des Gebäudes inklusive der Installation der zentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung beträgt daher mindestens 5.000 Euro. Der Mehraufwand für die Montage der im Innenraum verlegten Lüftungskanäle, führt zu erheblichen Einschränkungen der Bewohner während der Sanierungsmaßnahme. Mögliche Mietminderungen werden hier jedoch nicht berücksichtigt.

7.3 Anwendung im Mehrgeschosswohnungsbau (GK4)

Am ausgewählten viergeschossigen Mehrfamilienhaus der Gebäudeklasse 4 werden nun verschiedene Lüftungssysteme mit fassadenintegrierter Luftkanalführung mithilfe der gesamtenergetischen Methodik aus Kapitel 5 analysiert und bewertet. Dabei werden die aus Kapitel 6.4 entwickelten Lösungsansätze für die baulichen Abhängigkeiten bei der Luftkanalführung auf der Fassade miteinbezogen. Die daraus resultierenden Luftkanalsysteme werden herkömmlichen wohnungszentralen Lüftungsanlagen hinsichtlich der erreichbaren Heizwärmeeinsparung, der hydraulischen Verteilung und des damit einhergehenden zusätzlichen Hilfsenergiebedarfs sowie des Systemwirkungsgrads des Lüftungssystems gegenübergestellt.

7.3.1 Gebäudebeschreibung und untersuchte Lüftungssysteme

Zur Untersuchung des Mehrgeschosswohnungsbaus wird das Beispielgebäude der GK4 gemäß Tab. 8 betrachtet. Das im Jahre 1954 errichtete Gebäude besteht aus insgesamt zwei Gebäudeteilen, die direkt aneinandergrenzen. Haus 1 ist ein dreispänniges Mehrfamilienhaus mit insgesamt zwölf Wohneinheiten auf vier Vollgeschossen und Haus 3 ein zweispänniges Gebäude mit acht Wohnungen auf ebenfalls vier Etagen. Das Gebäude ist ein Massivbau aus Hohlblocksteinen und steht in städtischer Lage mit Blockrandbebauung in der Nauheimer Straße 1-3 in Frankfurt a.M. Die beiden Hauptfassaden sind nach Osten und Westen orientiert. Auf der Hofseite im Osten des Hauses befinden sich in jedem Geschoss Loggien. Der Keller und das nicht ausgebaute Dachgeschoss sind unbeheizt. Der Regelgrundriss der Gebäude sowie die Ost- und Westansichten sind im Anhang in Abb. A 24 bis Abb. A 26 dargestellt. Die beheizte

Wohnfläche des Gebäudes beträgt 1.192 m² und das beheizte Raumvolumen ergibt sich zu 3.039 m³.

Für die beiden Gebäude der ABG Frankfurt Holding war im Jahr 2014 eine energetische Sanierung geplant. Dazu werden an die 300 mm dicke Ziegelaußenwand ein WDVS mit einer 160 mm starken Dämmschicht angebracht und die bestehenden Kunststoffenster durch neue Fenster mit Wärmeschutz-Isolierverglasung ersetzt. Die Kellerdecke soll außerdem unterseitig mit einer 80 mm dicken Wärmedämmschicht isoliert werden. Die oberste Geschossdecke weist im Ausgangszustand bereits eine Wärmedämmschicht auf. Die Materialkenndaten der Bauteilaufbauten vor und nach der geplanten energetischen Sanierung sind im Anhang in Tab. A 16 und Tab. A 17 aufgelistet. Die Beheizung des Gebäudes erfolgt bisher über Gasetagenheizungen in den einzelnen Wohnungen. Die dafür benötigten Gasleitungen sowie die Rauchabzüge befinden sich in den alten Schächten in Bädern und Küchen, die früher für Einzelfeuerungsstätten bzw. Gaseinzelöfen genutzt wurden. Die Gasthermen sollen nach der Sanierung des Gebäudes durch eine zentrale Gas-Brennwert-Heizung im Keller ersetzt werden.

Im Ausgangszustand werden die Gebäude über Fenster und Türen natürlich belüftet. Durch den geplanten Austausch aller Fenster in den 20 Wohnungen muss gemäß [DIN 1946-6] ein Lüftungskonzept erstellt werden, mit dem entschieden werden kann, ob Lüftungstechnische Maßnahmen erforderlich sind. Übersteigt der erforderliche Luftvolumenstrom zum Feuchteschutz $q_{v,ges,NE,FL}$ einer Nutzungseinheit die Infiltrationsluftmenge der Nutzungseinheit $q_{v,Inf,wirk}$, so sind Lüftungstechnische Maßnahmen in Form eines nutzerunabhängigen Lüftungssystems notwendig. Am Beispiel der Wohnung 1 wird die Notwendigkeit Lüftungstechnischer Maßnahmen entsprechend dem Nachweisverfahren durchgeführt. Für die Nutzungseinheit mit einer Grundfläche A_{NE} von 69,34 m² und einem Faktor zur Berücksichtigung des Wärmeschutzes f_{WS} von 0,4 beträgt der Luftvolumenstrom für den Feuchteschutz mit nachstehender Gleichung 37,97 m³/h.

$$q_{v,ges,NE,FL} = f_{WS} \cdot (-0,001 \cdot A_{NE}^2 + 1,15 \cdot A_{NE} + 20) \quad (7.1)$$

Der wirksame Infiltrationsluftvolumenstrom berechnet sich wie folgt:

$$q_{v,Inf,wirk} = f_{wirk,Komp} \cdot A_{NE} \cdot H_R \cdot n_{50} \cdot \left(f_{wirk,Lage} \cdot \frac{\Delta p}{50} \right)^n \quad (7.2)$$

Der n_{50} -Bemessungswert wird für bestehende Gebäude mit einem Wert von 4,5 h⁻¹ angesetzt und der Auslegungs-Differenzdruck wird mit 2 Pa für eingeschossige Nutzungseinheiten bei einem Druckexponenten von $n=2/3$ angenommen. Bei einem Faktor $f_{wirk,Komp}$ von 0,5 für freie Lüftung, einer Raumhöhe H_R von 2,5 m und einem Wert von 1,0 für $f_{wirk,Lage}$ bei Gebäuden bis zu vier Geschossen erhält man einen Infiltrationsvolumenstrom 0,21 m³/h. Wie bei der energetischen Sanierung mit Fensteraustausch zu erwarten ist, übersteigt der zum Feuchteschutz notwendige Luftvolumenstrom den wirksamen Infiltrationsluftvolumenstrom, sodass für das zu untersuchende Gebäude Lüftungstechnische Maßnahmen zu treffen sind. Die erforderlichen Volumenströme für die einzelnen Räume sollen über ein ventilatorgestütztes Lüftungssystem bereitgestellt werden. Die Dimensionierung der Luftmengen aller Räume der 20 Wohneinheiten ist in Tab. A 18 im Anhang zu finden. Es sollen insgesamt drei verschiedene Lüftungssysteme analysiert und

miteinander verglichen werden. Bei zwei Systemen handelt es sich um zentrale Zu- und Abluftanlagen mit WRG, die jeweils mehrere Nutzungseinheiten belüften und die außerhalb der Wohnungen aufgestellt werden. Alternativ dazu werden wohnungszentrale Lüftungsanlagen untersucht, die getrennt in jeder Wohnung installiert werden. Abluftsysteme sowie bedarfsgeführte Systeme mit geringeren Luftwechseln werden aus Vergleichsgründen nicht den zentralen Lüftungssystemen gegenübergestellt. Eine Übersicht der verschiedenen Lüftungssysteme ist in Tab. 10 wiedergegeben.

Tab. 10: Übersicht der untersuchten Lüftungssysteme an den Mehrfamilienhäusern

Beschreibung	Zuluftführung	Abluftführung	Lüftungsabschnitte
Zentrales Lüftungssystem mit 2 Lüftungsgeräten	fassadenintegriert	in den Schächten integriert	Haus 1+3 EG+1.OG Haus 1+3 2.OG+3.OG
Zentrales Lüftungssystem mit 4 Lüftungsgeräten	fassadenintegriert	in den Schächten integriert	Haus 1 EG+1.OG Haus 1 2.OG+3.OG Haus 3 EG+1.OG Haus 3 2.OG+3.OG
Wohnungslüftungsanlagen	innenliegend	innenliegend	für jede Wohnung einzeln

Für die beiden GK4-Gebäude wird ein umlaufender Brandriegel benötigt, um die Schwerentflammbarkeit des anzubringenden WDVS zu erhalten. Der Brandriegel, der zwischen dem zweiten und dritten Geschoss angeordnet ist, verhindert die Brandweiterleitung in das darüberliegende Geschoss. Für das zentrale Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Zuluftführung werden daher zwei Lüftungsabschnitte angenommen, die jeweils zwei Geschosse (EG und 1.OG bzw. 2.OG und 3.OG) beider Gebäude versorgen und somit den Brandriegel nicht durchbrechen. In einer zweiten Variante werden die Lüftungsabschnitte nochmals unterteilt, sodass je zwei Etagen jeweils eines der beiden Häuser mit einem Lüftungsgerät versorgt werden. In Abb. 97 und Abb. 98 ist die Zuluftkanalführung für die beiden zentralen Varianten auf der West- und Ostfassade des Gebäudes sowie der Brandriegel aus Mineralwolle zu sehen. Die Lüftungskanäle versorgen je einen Raum und werden über eine Kernbohrung mit dem Wohnraum verbunden.



Abb. 97: Westansicht der Gebäude mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung für das zentrale Lüftungssystem



Abb. 98: Ostansicht der Gebäude mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung für das zentrale Lüftungssystem

Auf der Rückseite der Gebäude ist aufgrund der Loggien und der teils schmalen Abstände zwischen Fenster und den anliegenden Innenwänden keine ausschließlich vertikale Kanalführung möglich. Aus diesem Grund werden für die Zuluftkanäle auch eine horizontale Verlegung angesetzt, bei der der Anschluss der Kanäle an den Raum unterhalb der Fenster im Bereich der Heizkörper erfolgt. Dadurch kann die Zuluft vorgewärmt und ein möglicher Kaltluftabfall durch größere Temperaturdifferenzen zwischen Kanalluft und Raumluft verhindert werden. Der Anschluss der Räume hinter den Balkonen erfolgt über die seitlichen Wände. Dadurch werden mehrere Umlenkungen der dämmstoffintegrierten Luftkanäle auf der Fassade nötig. Ein punktuelles Durchbrechen der Balkonplatten wird nicht benötigt. Durch die Lage der Kellerfenster unterhalb der Balkonplatten des Erdgeschosses ist zudem ein direkter Anschluss an den Keller

nicht möglich. Die Abluftkanalführung kann aus Platzgründen für diese Art der Leitungsführung mit einem einzelnen Luftkanal je zu versorgendem Raum nicht an der Fassade angeordnet werden. Daher werden die Abluftkanäle, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, über die bestehenden Schornsteine geplant. Dazu kann für jeden Abluftraum (Küche und Bad je Wohneinheit) ein flexibles Metallrohr mit einem Nenndurchmesser von 80 mm eingesetzt werden, die im Keller bzw. Dachraum miteinander verbunden werden. Im Keller können bei der Zusammenführung der Teilstränge an zentral zugänglicher Stelle Brandschutzklappen angeordnet werden. Die notwendigen Bauarbeiten in den einzelnen Wohnungen des Gebäudes werden bei diesem Lüftungskonzept auf ein Minimum reduziert. So sind lediglich beim Anschluss der Lüftungskanäle an den Raum Arbeiten innerhalb der Wohnungen erforderlich. Die Wartung des Zentralgeräts sowie der regelmäßige Austausch der Luftfilter können komplett im zugänglichen Dach- oder Kellerraum durchgeführt werden. Die Nennweite der Verteil- und Sammelkanäle im Inneren der Gebäude im Keller und Dachraum werden mithilfe des Berechnungsprogramms mh-KanCALC strömungsgünstig angepasst. Das bedeutet, Kanäle, die mit einem hohen Luftvolumenstrom durchströmt werden, weisen zur Verringerung des Druckverlustes einen größeren Nenndurchmesser auf als Kanäle mit einem kleineren Massendurchsatz. Eine Darstellung des Zu- und Abluftkanalnetz der beiden zentralen Lüftungssysteme mit WRG für das 2-Anlagensystem und das 4-Anlagensystem ist in Abb. A 27 und Abb. A 28 im Anhang aufgeführt.

Die beiden zentralen Lüftungssysteme werden mit einem konventionellen System aus 20 wohnungszentralen Lüftungsanlagen mit innenliegender Kanalführung hydraulisch und energetisch gegenübergestellt. Abb. 99 zeigt die Leitungsführung in den fünf Wohnungen eines Regelgrundrisses. Das Zentralgerät in jeder Wohnung ist jeweils im Bad angeordnet und die Räume werden über eine Ringleitung im Flur angeschlossen.

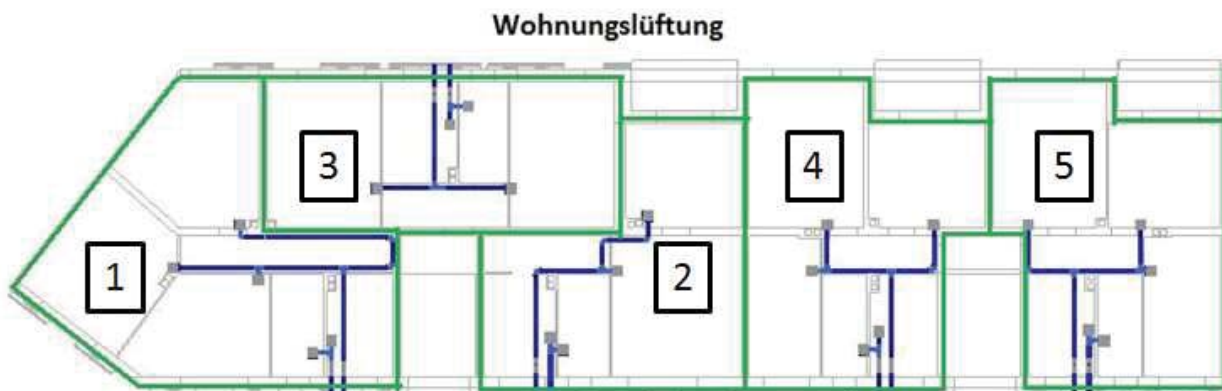


Abb. 99: Schema der Luftleitungsführung eines Geschosses mit nachträglich installierten wohnungszentralen Lüftungsanlagen

Die Vorteile dieses Systems liegen im geringen Planungsaufwand, den kurzen Leitungswegen und den damit verbundenen niedrigen Druckverlusten sowie der einfachen Regelbarkeit der Volumenströme. Der Wartungsaufwand und die nötigen Arbeiten in den Wohnungen, wie die Installation des Lüftungsgeräts und der Rohrleitungen sowie deren Verkleidung, sind allerdings deutlich höher und führen über einen längeren Zeitraum zu Beeinträchtigungen der Bewohner.

Die Systemdruckverluste aller Lüftungsabschnitte der drei Lüftungssysteme werden mithilfe des statischen Berechnungsprogramms mh-software bestimmt. Dabei werden die gewünschten

Luftmengen an den einzelnen Ein- und Auslässen fixiert und der Druckabfall am längsten bzw. ungünstigsten Strang ermittelt. Die Dimensionierung der Kanalquerschnitte im Keller- und Dachgeschoss wird von der Software automatisch angepasst, um den zulässigen Luftgeschwindigkeitsbereich einzuhalten. Die dämmstoffintegrierten Kanäle auf der Fassade und die Abluftkanäle in den alten Schornsteinen sind von der automatischen Anpassung ausgenommen. Das Kanalnetz enthält zudem die Druckverluste von Einbauten wie Schalldämpfern und den Tellerventilen, die aus Literaturwerten entnommen werden. Für die Druckverlustkennwerte der fassadenintegrierten Lüftungskanäle sowie der Einzelwiderstände am Wandanschluss und der 90°-Umlenkung werden die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 4.3 verwendet. Mithilfe des Systemdruckverlustes und des erforderlichen Gesamtluftvolumenstroms können dann ein passender Ventilator ausgewählt und die elektrische Leistungsaufnahme und der jährliche Hilfsstrombedarf während der Betriebszeit bestimmt werden.

Die Bestimmung des Heizwärmebedarfs der Mehrfamiliengebäude im Ausgangszustand, nach der baulichen Sanierung und durch Einsatz der drei verschiedenen Lüftungssysteme erfolgt mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS 17. Dazu wird ein 3D-Gebäudemodell angefertigt, das alle Geometrie- und Oberflächendaten des Gebäudes enthält. Das Modell besteht aus insgesamt 23 verschiedenen Zonen, die jeweils die 20 Wohneinheiten, die beiden Treppenhäuser und das unbeheizte Kellergeschoss repräsentieren. Zur Vereinfachung wird das Dachgeschoss aufgrund der bestehenden Dämmung der obersten Geschossdecke nicht als Zone abgebildet, sondern es wird lediglich ein typischer Temperaturverlauf über das Jahr als thermische Randbedingung für die Berechnung der Wärmeverluste angenommen.

Für die energetischen Berechnungen wird der Klimadatensatz der TRY-Region 12 für Frankfurt a.M. verwendet. Der mittlere Verlauf der Außenlufttemperatur und die Monatssummen der Global-, Diffus- und Direktstrahlung der Klimaregion 12 sind in Abb. A 17 im Anhang angegeben. Die anzusetzenden Nutzerrandbedingungen haben großen Einfluss auf das thermisch-energetische Verhalten von Gebäuden. Daher empfiehlt es sich, standardisierte Randbedingungen für den Infiltrationsluftwechsel, die Heizungs- und Lüftungsstrategie, die Nutzungszeiten des Gebäudes und die internen Wärmequellen zu verwenden, um vergleichbare Ergebnisse innerhalb der unterschiedlichen Varianten zu erhalten. In [DIN V 18599-10] sind die Nutzungsprofile für Wohngebäude in Ein- und Mehrfamilienhäuser unterteilt. Die Infiltrations- und Fensterluftwechsel und die internen Wärmequellen werden gemäß Tab. 4 und Tab. 5 angenommen. So betragen die internen Wärmeeinträge im Mehrfamilienhaus täglich 90 Wh/(m²d) und die Raumtemperatur wird während der Heizperiode am Tage auf 20°C gehalten und nachts auf 18°C abgesenkt.

Die Wärmeverluste der fassadengeführten Lüftungskanäle sowie der im Keller und Dachboden verlegten Leitungen der beiden zentralen Systeme fließen in die gesamtenergetische Bilanzierung mit ein. Dazu wird die Luftkanalführung mithilfe des dynamischen Durchflussmodells aus Kapitel 5.4.1 abgebildet und die Wärmeverluste während der Betriebszeit der Lüftungsanlage bestimmt. Die Luftkanalführung bei den Wohnungslüftungsanlagen führt zu keinen Wärmeverlusten. Der Wärmerückgewinnungsgrad der zentralen Anlagen und der Wohnungslüftungsgeräte wird in der Simulation mit einem Wert von 80 % angesetzt.

7.3.2 Untersuchungsergebnisse

Hydraulische Verteilung und Druckverluste

Die statisch berechneten Druckverluste sind zusammen mit den geförderten Luftvolumenströmen aller Lüftungsstränge der drei Lüftungssysteme in Tab. 11 und Tab. 12 aufgelistet. Die Luftkanalführung des zentralen Lüftungssystems mit zwei Anlagen führt aufgrund der größeren Luftmengen in den einzelnen Kanälen und den längeren Luftleitungen zu höheren Druckverlusten als das zentrale System mit vier Anlagen.

Tab. 11: Berechnete Druckverluste der einzelnen Stränge beider zentraler Lüftungssysteme und gesamter geförderter Luftvolumenstrom pro Lüftungsabschnitt

Zentrales Lüftungssystem 2-Anlagen System		Druckverlust [Pa]	Volumenstrom [m³/h]
Haus 1+3	EG+1.OG Zuluft	158	830
	EG+1.OG Abluft	146	836
	2.OG+3.OG Zuluft	122	830
	2.OG+3.OG Abluft	121	836
Zentrales Lüftungssystem 4-Anlagen System		Druckverlust [Pa]	Volumenstrom [m³/h]
Haus 1	EG+1.OG Zuluft	106	506
	EG+1.OG Abluft	100	508
	2.OG+3.OG Zuluft	82	506
	2.OG+3.OG Abluft	84	508
Haus 3	EG+1.OG Zuluft	63	324
	EG+1.OG Abluft	75	328
	2.OG+3.OG Zuluft	55	324
	2.OG+3.OG Abluft	70	328

Die Luftleitungsführung für die unteren beiden Geschosse (EG und 1.OG) verursacht aufgrund der längeren Luftkanäle größere Systemdruckverluste als die Kanalabschnitte für die oberen beiden Geschosse (2.OG und 3.OG). Die einzelnen Wohnungslüftungsanlagen unterscheiden sich sowohl in den geförderten Luftmengen als auch den daraus resultierenden Druckverlusten untereinander kaum.

Tab. 12: Berechnete Druckverluste der Wohnungslüftungsanlagen und gesamter geförderter Luftvolumenstrom pro Lüftungsabschnitt

Wohnungszentrale Lüftungsanlagen (je Geschoss)		Druckverlust [Pa]	Volumenstrom [m³/h]
Wohnung 1	Zuluft	42	87
	Abluft	39	86
Wohnung 2	Zuluft	46	83
	Abluft	38	84
Wohnung 3	Zuluft	42	83
	Abluft	38	84
Wohnung 4	Zuluft	38	81
	Abluft	36	82
Wohnung 5	Zuluft	33	81
	Abluft	36	82

Aus dem Gesamtdruckverlust und dem Volumenstrom bei Nennlüftung kann jeweils der Auslegungsbetriebspunkt des Ventilators der Lüftungsanlage bestimmt werden. Für alle drei Anlagensysteme werden passende Zentralgeräte und dazugehörige Radialventilatoren auf Basis von Herstellerangaben ausgesucht. Mit dem Ventilatorwirkungsgrad des gewählten Lüfters im Betriebspunkt kann nach Formel (2.2) der Leistungsbedarf berechnet werden. In Tab. 13 sind die mittleren Ventilatorwirkungsgrade der Lüftungsanlagen und die Anschlussleistungen aller Lüfter der jeweiligen Lüftungsabschnitte der Systeme dargestellt.

Der Betriebspunkt im Ventilator Kennlinienfeld entscheidet über den Wirkungsgrad des Lüfters. Die Ventilatoren werden so gewählt, dass der maximale Wirkungsgrad des Ventilators im Auslegungspunkt bei Nennlüftung erreicht wird. Wie in der Zusammenstellung der Lüftungsabschnitte mit den Ventilatoren zu sehen, weisen große Lüfter höhere Wirkungsgrade als kleinere Anlagen auf. Die kleinen Ventilatoren der 20 Wohnungslüftungsanlagen führen daher auch auf eine deutlich höhere Gesamtleistungsaufnahme als der Leistungsbedarf bei den beiden zentralen Systemen. Viele kleine Lüftungsabschnitte sind hinsichtlich der Anlageneffizienz der Lüftungsanlage ungünstiger als wenige große Anlagen. Bei der Planung der Lüftungsabschnitte ist jedoch nicht nur auf die Auswahl der Ventilatoren zu achten, sondern auch auf eine kurze Leitungsführung mit wenigen Umlenkungen und eine strömungsgünstige Luftverteilung.

Tab. 13: Anschlussleistung und Wirkungsgrade der Ventilatoren der untersuchten Lüftungs-systeme

Lüftungssystem		P_{el} [W]	Summe P_{el} [W]	Ventilator- wirkungsgrad η_v [%]	Mittlerer Wirkungs- grad $\eta_{v,mittel}$ [%]	
zentral 2-Anlagen- system	Haus 1+3	EG+1.OG Zuluft	75,6	266	48	47
		EG+1.OG Abluft	70,7		48	
		2.OG+3.OG Zuluft	60,1		47	
		2.OG+3.OG Abluft	60		47	
zentral, 4-Anlagensystem	Haus 1	EG+1.OG Zuluft	90	420	17	15
		EG+1.OG Abluft	87,5		16	
		2.OG+3.OG Zuluft	79,3		15	
		2.OG+3.OG Abluft	80,3		15	
	Haus 3	EG+1.OG Zuluft	19,8		24	27
		EG+1.OG Abluft	23,6		29	
		2.OG+3.OG Zuluft	17,6		28	
		2.OG+3.OG Abluft	22		29	
Wohnungslüftungsanlagen pro Geschoss	Wohnung 1 Zuluft	13,9	523	7	7	
	Wohnung 1 Abluft	13,3		7		
	Wohnung 2 Zuluft	14,4		7		
	Wohnung 2 Abluft	13		7		
	Wohnung 3 Zuluft	13,7		7		
	Wohnung 3 Abluft	13		7		
	Wohnung 4 Zuluft	12,8		7		
	Wohnung 4 Abluft	12,5		7		
	Wohnung 5 Zuluft	11,8		7		
	Wohnung 5 Abluft	12,5		7		

Gesamtenergetische Bilanzierung

Neben dem spezifischen Heizwärmebedarf der beiden Gebäude vor und nach der Sanierung müssen auch die Wärmeverluste der fassadenintegrierten und innenliegenden Leitungsführung im Dach- und Kellergeschoss der beiden zentralen Lüftungssysteme berücksichtigt werden. Hierfür wird das in Kapitel 5.4.1 entwickelte Modell für die Berechnung der instationären Wärmevorgänge verwendet, um den Systemwirkungsgrad der unterschiedlichen Varianten zu ermitteln. In Abb. 100 ist der spezifische Heizwärmebedarf der beiden Gebäude im Ausgangszustand, nach der energetischen Sanierung der Außenwände, der Fenster und der Kellerdeckendämmung sowie bei Einsatz der verschiedenen Lüftungssysteme wiedergegeben. Durch die bauliche Modernisierung kann der spezifische Heizwärmebedarf der Gebäude von 121,1 kWh/(m²a) im unsanierten Zustand um ca. 66 % auf 41,7 kWh/(m²a) reduziert werden. Durch Einsatz eines der drei Lüftungssysteme können die Lüftungswärmeverluste deutlich minimiert und der Energiebedarf weiter um etwa 50 % gemindert werden. Aufgrund der Wärmeverluste über die Luftkanalführung bei den zentralen Systemen ist die Einsparung bei Nutzung der Wohnungslüftungsanlagen etwas höher.

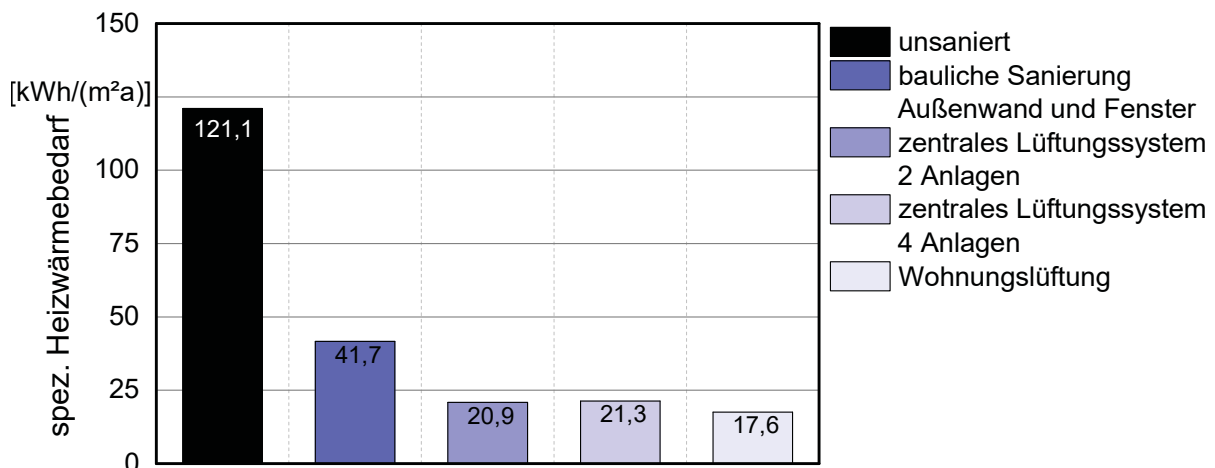


Abb. 100: Vergleich der berechneten spezifischen Heizwärmebedarfe der beiden Mehrfamilienhäuser im Ausgangszustand, nach der baulichen Sanierung sowie nach Installation eines zentralen Lüftungssystems mit je zwei und vier Anlagen und bei Einsatz von Wohnungslüftungsanlagen

Die Luftkanalführung über die dämmstoffintegrierten Kanäle auf der Fassade und die Verlegung der Verteil- und Sammelleitung im Dachboden und Kellergeschoss verursachen während der Betriebszeit der beiden zentralen Lüftungssysteme Wärmeverluste, die sich auf das energetische und thermische Verhalten des Gesamtsystems auswirken. In Abb. 101 sind die jährlichen Wärmeabflüsse über das Luftkanalnetz und die Wärmeverluste getrennt nach fassadenintegrierter Kanalführung und innenliegender Leitungsführung für das 2-Anlagensystem und das 4-Anlagensystem dargestellt. Die energetischen Verluste betragen für die Anlage mit zwei Lüftungsabschnitten 4.033 kWh/a und liegen etwa 7 % über den Verlusten von 3.759 kWh/a bei der Anlage mit vier Lüftungsabschnitten. Die fassadengeführte Leitungsführung verursacht in beiden Varianten etwa 80 % der Gesamtwärmeverluste. Die restlichen 20 % der Wärmeabflüsse sind auf die gedämmten Sammel- und Verteilleitungen im Dach- und Kellergeschoss zurückzuführen.

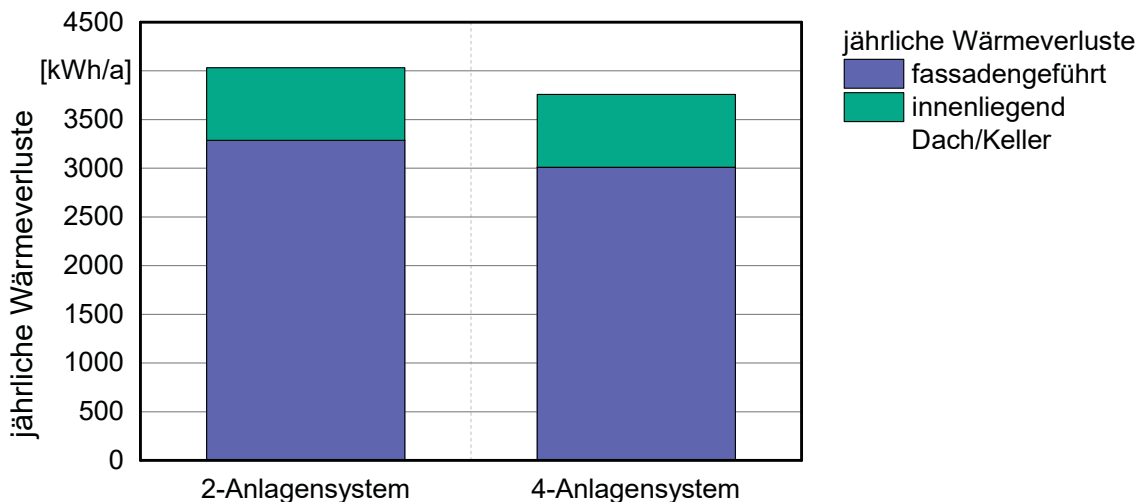


Abb. 101: Berechnete jährliche Wärmeverluste während der Nutzungszeit beider zentraler Lüftungssysteme, Anteile getrennt für die fassadenintegrierte Luftkanalführung und die Leitungsführung im Dachboden bzw. im Keller

Zur Bestimmung des Systemwirkungsgrads der drei untersuchten Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung werden nicht nur die Wärmeverluste über das Luftkanalnetz bewertet, sondern auch die während der Nutzungszeit der Lüftungsanlage an den Wärmeübertragern zurückgeführte Wärmeenergie. In Abb. 102 ist die an den Lüftungsgeräten zurückgewonnene Wärmemenge der drei untersuchten Lüftungssysteme den jährlichen Wärmeverlusten gegenübergestellt.

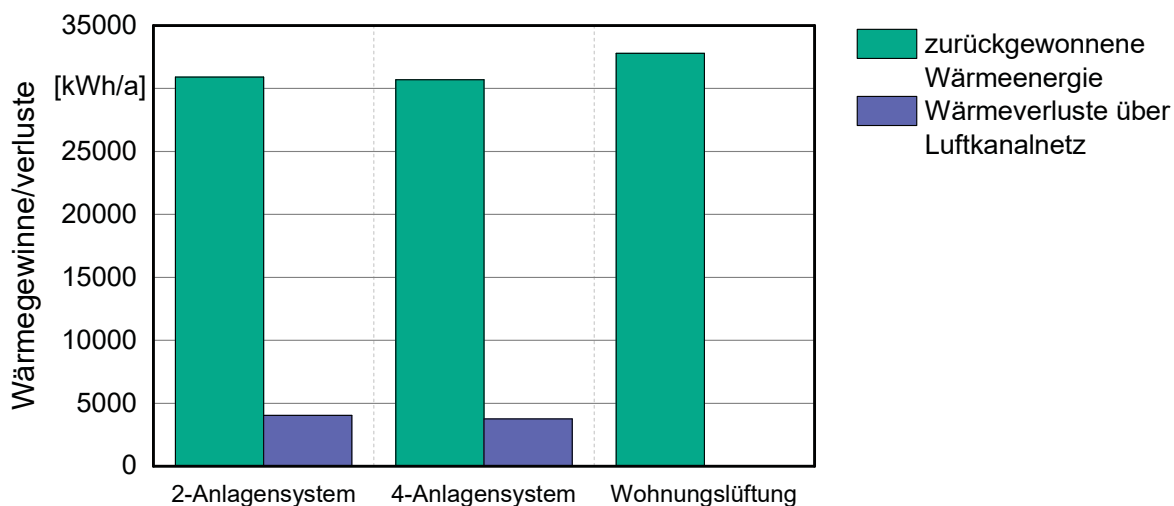


Abb. 102: Vergleich der jährlich am Wärmeübertrager der Lüftungsgeräte zurückgewonnenen Wärmeenergie und der Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes der sanierten Gebäude bei Einsatz der zentralen Lüftungssysteme und bei Nutzung wohnungszentraler Lüftungsanlagen

Hier ist zu erkennen, dass die den Gebäuden zurückgeführte Wärmeenergie der beiden zentralen Lüftungssysteme etwas geringer ist als bei der Variante mit wohnungszentralen Lüftungsanlagen, obwohl der angesetzte Wärmerückgewinnungsgrad bei allen Lüftungssystemen 80 % beträgt. Im Gegensatz zu den gebäudezentralen Lüftungssystemen führen die Wohnungslüftungsanlagen zu keinen Wärmeverlusten, da die gesamte Luftkanalführung der 20 Lüftungsanlagen innerhalb der jeweiligen Wohnung installiert ist.

Der Systemwirkungsgrad kann nach Gleichung (5.27) aus dem Verhältnis der am Wärmeübertrager zurückgewonnenen Wärmemenge zur maximal möglichen Energiemenge eines idealisierten Lüftungssystems mit 100 % Wärmerückgewinnung ohne Wärmeverluste über das Kanalnetz errechnet werden. Für das zentrale Lüftungssystem mit zwei Lüftungsgeräten beträgt der Systemwirkungsgrad 72,4 %, sodass sich der Rückgewinnungsgrad des gesamten Lüftungssystems um etwa 10 Prozentpunkte gegenüber dem Wärmerückgewinnungsgrad des Wärmeübertragers reduziert. Das zentrale System mit vier Lüftungsgeräten weist einen Wärmerückgewinnungsgrad von 72,9 % auf.

Die erzielbaren Energieeinsparungen der untersuchten Lüftungssysteme wurden bisher auf Basis des Heizwärmebedarfs der Gebäude, einer nutzenergetischen Kenngröße, ausgewertet, die somit unabhängig vom eingesetzten Heizungssystem vergleichbar ist. Um den zusätzlichen Energiebedarf für den Betrieb der Lüftungsanlage bewerten zu können, wird die Primärenergieeinsparung der drei Varianten im Falle der Verwendung eines Gas-Brennwert-Gerätes bestimmt. Dazu werden die Energieverluste für die Erzeugung, Verteilung, Speicherung, Übergabe sowie die vorgelagerte Prozesskette der Energieträger normativ ermittelt. Die Primärenergieeinsparung errechnet sich aus der Differenz der jährlichen Heizwärmeeinsparung zum jährlichen Hilfsenergiebedarf für den Lüfterstrom nach Gleichung (7.3).

$$\Delta Q_p = (e_{p,BW-Kessel} \cdot \Delta Q_h + Q_{Verteilung}) \cdot f_{p,Erdgas} - f_{p,Strom} \cdot Q_{el} \quad (7.3)$$

Zunächst werden beide Energiebedarfe über die Primärenergiefaktoren f_p für Erdgas und Strom und die Heizwärmeeinsparung über die Anlagenaufwandszahl e_p des Heizsystems bewertet. Der zentrale Gas-Brennwert-Kessel erhält nach [EnEV 2009] eine Aufwandszahl von $e_p=1,07$ und die Verluste der zentralen Heizungsverteilung werden mit $3,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ angenommen [Ornth 2009]. Der Hilfsenergiebedarf der untersuchten Lüftungssysteme ergibt sich aus der Nutzungszeit der Lüftungsanlage während der Heizperiode und der Gesamtanschlussleistung der Ventilatoren nach Tab. 13.

Der Vergleich der Heizwärmeeinsparung, des zusätzlichen Hilfsstrombedarfs und der Primärenergieeinsparung für die beiden zentralen Lüftungssysteme mit zwei und vier Anlagen und für das System mit wohnungszentralen Lüftungsanlagen ist in Abb. 103 dargestellt. Durch den Einsatz der Wohnungslüftungsanlagen kann gegenüber den zentralen Lüftungsanlagen eine höhere Heizwärmeeinsparung erzielt werden. Diese liegt um etwa 16 % über der Einsparung des 2-Anlagensystems und um etwa 18 % über der Heizwärmeeinsparung des 4-Anlagensystems. Dieser Unterschied ist auf die Wärmeverluste der Lüftungsleitungen der zentralen Systeme zurückzuführen, die sowohl in der Fassade integriert als auch im Dachboden und Kellergeschoss verlegt sind. Die Lüftungskanäle der wohnungszentralen Anlagen liegen innerhalb des beheizten Gebäudevolumens und führen zu keinen Wärmeverlusten. Der Hilfsenergiebedarf der Wohnungslüftungsanlagen ist aufgrund der höheren Gesamtanschlussleistung der Ventilatoren und der deutlich niedrigeren Ventilatorwirkungsgrade nahezu doppelt so hoch wie der Strombedarf des zentralen Lüftungssystems mit zwei Lüftungsabschnitten und liegt etwa 25 % über dem Hilfsenergiebedarf des 4-Anlagensystems. Bei gleichem gefördertem Gesamtvolumenstrom für die Belüftung der beiden Mehrfamilienhäuser sind große zentrale Lüftungsgeräte bezüglich des Lüfterstrombedarfs energieeffizienter als mehrere kleine Lüftungsanlagen.

Vergleicht man die erreichbare Primärenergieeinsparung der beiden Mehrgeschossbauten in Frankfurt durch den Einsatz der drei untersuchten Lüftungssysteme, so zeigen die dezentralen Wohnungslüftungsanlagen mit 32 MWh/a die höchste jährliche Energieeinsparung. Die Einsparung des 2-Anlagensystems liegt ca. 3 % und im Falle des 4-Anlagensystems etwa 12 % unter der Primärenergieeinsparung des Wohnungslüftungssystems. Hinsichtlich des Heizwärmebedarfs, des benötigten Hilfsenergieeinsatzes und der Primärenergieeinsparung ist das zentrale System mit nur zwei Lüftungsabschnitten und Lüftungsgeräten günstiger als das System mit vier etwas kleineren Lüftungsanlagen.

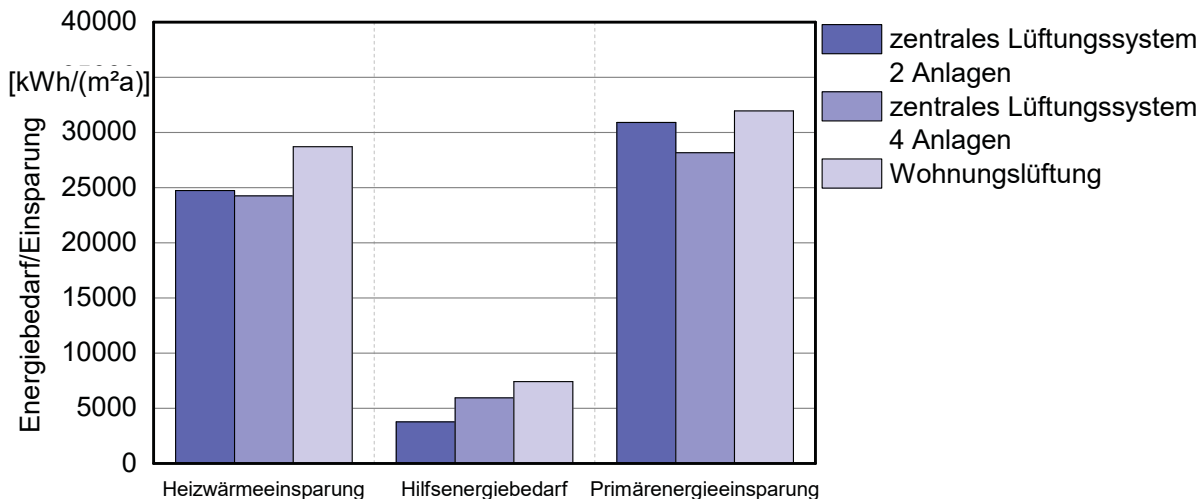


Abb. 103: Vergleich der Heizwärmeeinsparung, des zusätzlichen Hilfsstrombedarfs und der Primärenergieeinsparung bei Einsatz der beiden zentralen Lüftungssysteme mit zwei und vier Lüftungsgeräten und bei Einsatz der Wohnungslüftungsanlagen

Investitionskosten

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Auswahl verschiedener Lüftungssysteme. Die drei untersuchten Lüftungsanlagenkonzepte werden über ein dynamisches Verfahren, die sogenannte Annuitätenmethode nach [VDI 2067], hinsichtlich der kapitalgebundenen Investitionskosten, der bedarfsgebundenen Kosten (Brennstoffkosten) sowie der betriebsgebundenen Kosten (Wartung und Inspektion) über einen Beurteilungszeitraum von 20 Jahren hinsichtlich ihrer jährlichen Annuitäten analysiert.

Die Investitionskosten der baulichen Sanierung der beiden Mehrfamilienhäuser bestehen aus dem Anbringen des WDVS, dem Austausch der alten Fenster und der Kellerdeckendämmung. Die Kosten des WDVS werden mit 130 €/m² angenommen und für den Fensteraustausch werden nach [BMVBS 2012] Kosten von 330 €/m² angesetzt. Für die Kellerdeckendämmung betragen die finanziellen Aufwendungen 40 €/m². Die Anschaffungspreise für die einzelnen Lüftungsanlagen werden auf Basis von Herstellerangaben [Heinemann 2014] angesetzt, Kosten für Formstücke und Luftleitungsbauteile für die Verlegung der Kanäle im Innenraum sowie im Dachboden und Keller stammen aus [Klimapartner 2012]. Die fassadenintegrierten Lüftungskanäle der beiden zentralen Systeme werden mit Mehrkosten der Einzelplatte von 50 % in Ansatz gebracht. In Tab. A 19 sind die Investitionskosten der baulichen Sanierungsmaßnahmen zusammengestellt. Die Investitionskosten der drei Lüftungssysteme inklusive der Montagekosten sind in Abb. 104 aufgetragen. Das System aus wohnungszentralen

Lüftungsanlagen führt hierbei zu den höchsten Investitionskosten. Diese liegen etwa 45 % über den Kosten des 2-Anlagensystems und ca. 30 % über den Kosten des 4-Anlagensystems. Der Anteil, der für die Anschaffung der 20 Lüftungsgeräte aufzubringen ist, beträgt für diese Variante über 75 %. Die restlichen Kosten fallen für die Luftkanalführung im Inneren der Wohneinheiten an. Die Aufteilung der Kosten zwischen den Lüftungszentralgeräten und des Luftkanalnetzes verhält sich für das Zentralsystem mit zwei bzw. vier Lüftungsabschnitten genau gegenteilig. So werden für die Lüftungsgeräte des 2-Anlagensystems etwa ein Drittel der Gesamtkosten benötigt und beim 4-Anlagensystem sind die Kosten für die Zentralgeräte und die Luftkanalführung etwa gleich hoch. Die Übersicht der Investitionskosten für die Installation der untersuchten Lüftungssysteme ist in tabellarischer Form in Tab. A 20 im Anhang zu finden.

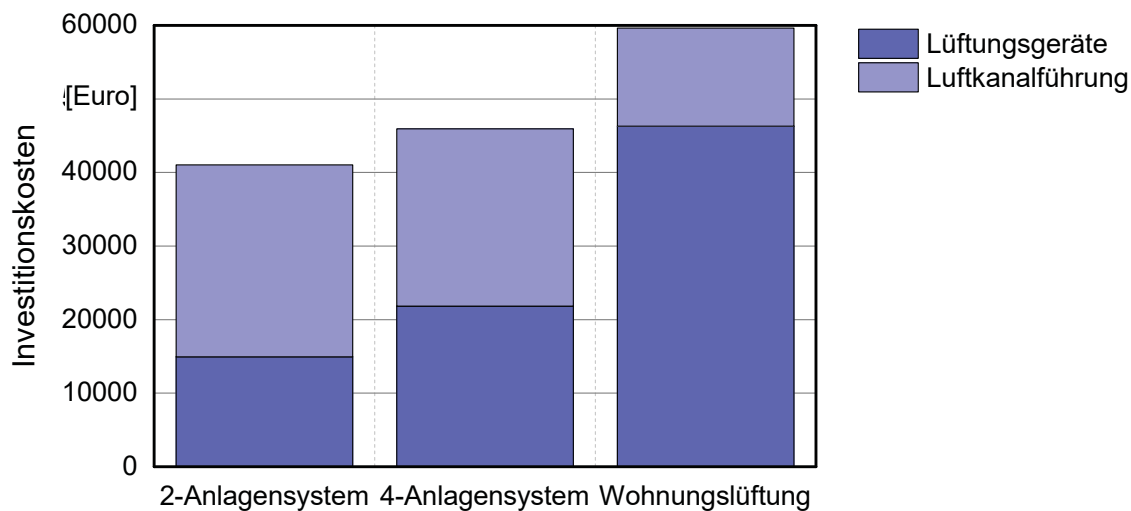


Abb. 104: Vergleich der Investitionskosten für die Lüftungstechnik der untersuchten Lüftungssysteme anteilig für die Lüftungsgeräte und die Luftkanalführung

Neben den Investitionskosten für die Installation der Lüftungssysteme werden für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch die bedarfsgebundenen Kosten, also die Stromkosten für die Lüftungsanlagen und der Brennstoffbedarf für die Beheizung der Gebäude sowie die Betriebskosten für die Wartung und Inspektion der Lüftungsanlagen berechnet. Ein Vergleich der bedarfsabhängigen Kosten der untersuchten Varianten ist in Tab. A 21 aufgeführt. Die jährlichen Aufwendungen für Instandsetzung und Wartung der Lüftungssysteme werden nach [VDI 2067] angesetzt. Des Weiteren werden für die Bestimmung der jährlichen Annuitäten für die drei verschiedenen Lüftungssysteme folgende Randbedingungen festgesetzt:

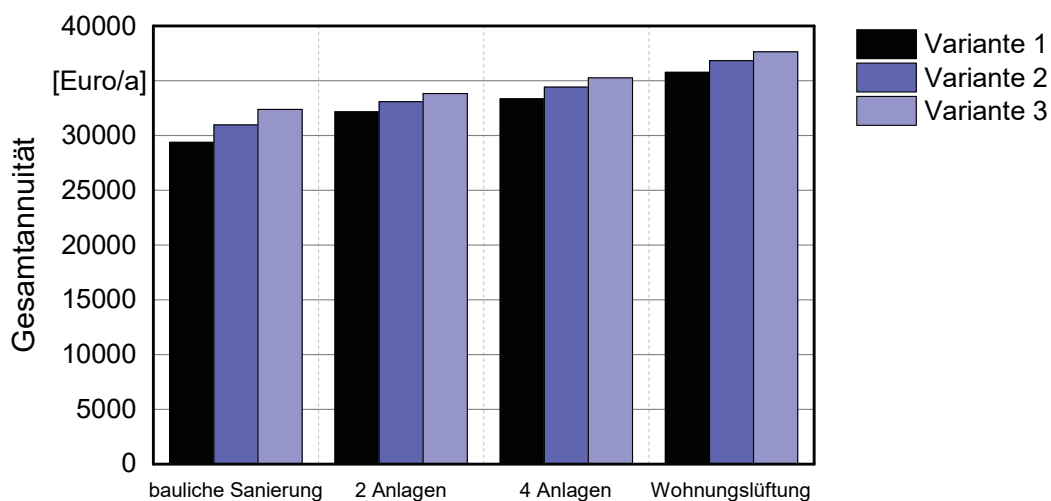
- Betrachtungszeitraum: 20 Jahre
- Zinsfaktor: 5 %
- Strompreis 0,267 €/kWh (Stand: Okt. 2013)
- Erdgaspreis: 0,065 €/kWh (Stand: Okt. 2013)
- Inflationsrate: 2 %

Um die Unsicherheit der Preissteigerung für die Energieträger Strom und Gas zu berücksichtigen, werden drei Berechnungsvarianten untersucht, die in Tab. 14 wiedergegeben sind.

Tab. 14: Übersicht der angesetzten jährlichen Energiepreissteigerungen für die Varianten

Variante	Strompreissteigerung in %	Brennstoffpreissteigerung in %
1	0	0
2	5	3
3	7	5

Abb. 105 enthält die jährlichen Annuitäten, die sich durch die bauliche Sanierung der beiden Mehrfamilienhäuser und bei zusätzlichem Einsatz der drei Lüftungssysteme ergeben. Die jährlichen Aufwendungen ohne Lüftungstechnik sind am niedrigsten. Für alle untersuchten Systeme steigen die Gesamtannuitäten mit größer werdender jährlicher Preissteigerung für Strom und Erdgas. Das zentrale 2-Anlagensystem führt bei allen drei untersuchten Varianten zu den geringsten jährlichen Aufwendungen. Dies liegt zum einen an den Investitionskosten, die im Vergleich zu den anderen Lüftungssystemen deutlich geringer sind, und zum anderen am jährlichen Betriebsstrombedarf, der aufgrund der niedrigeren Anschlussleistungen für die Ventilatoren niedriger ist gegenüber den anderen untersuchten Lüftungsanlagen. Das System aus wohnungszentralen Lüftungsanlagen zeigt für alle angesetzten Brennstoffsteigerungsraten die höchste Gesamtannuität.

**Abb. 105:** Gesamtannuitäten für die bauliche Sanierung der beiden Gebäude und bei zusätzlichem Einsatz der drei Lüftungssysteme

7.4 Zusammenfassende Bewertung

Ziel in diesem Kapitel ist es, mithilfe der Methode zur gesamtenergetischen Bilanzierung aus Kapitel 5, die entwickelten Lüftungssysteme für die Anwendung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung an zwei Gebäuden bewerten zu können. Bei den ausgewählten Gebäuden handelt es sich um das Demonstrationsgebäude in Kassel, einem Zweifamilienhaus und einem mehrgeschossigen Wohngebäude der Gebäudeklasse 4. Die entwickelten Sanierungslösungen mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen werden jeweils herkömmlichen Lüftungssystemen mit innenliegender Luftkanalführung gegenübergestellt. Mithilfe der Untersuchungen soll gezeigt werden, ob das entwickelte Lüftungssystem im Vergleich zu konventionellen Systemen für die Sanierung des Wohngebäudebestandes geeignet ist. Dazu werden über die gesamtenergetische Bewertung die Energieeinsparung und der Systemwirkungsgrad bestimmt und die hydraulischen Kennwerte, wie der Systemdruckverlust sowie der daraus resultierende Hilfsenergiebedarf berechnet.

Das am Testgebäude in Kassel umgesetzte Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung wird mit zwei herkömmlichen Systemen mit jeweils innenliegender Luftverteilung verglichen. Die Systeme weisen je eine horizontale und eine vertikale Anbindung zu den Räumen auf. Die am Demonstrationsgebäude gemessenen Druckverluste im Zu- und Abluftkanalnetz sind mehr als doppelt so hoch wie die berechneten Systemdruckverluste für die beiden innenliegenden Luftkanalsysteme. Aus diesem Grund ist der zusätzliche jährliche Hilfsstrombedarf mit ca. 270 kWh/a auch knapp doppelt so hoch wie der Hilfsenergiebedarf der Referenzsysteme. Die messtechnische Analyse zeigte jedoch, dass am umgesetzten System aufgrund der dort verbauten Dämmstoffplatten Leckagen vorliegen.

Die auf Basis der gesamtenergetischen Bewertung ermittelten Systemwirkungsgrade liefern für die innenliegenden Systeme Werte von 81,5 % für die horizontale und 82,9 % für die vertikale Verteilung. Das fassadenintegrierte Lüftungssystem führt in der dynamischen Simulation zu einem Systemwirkungsgrad von 73,3 %. Der Heizwärmebedarf nach der Sanierung liegt etwa 3 % über dem Wärmebedarf der Referenzsysteme. Betrachtet man die Investitions- und Betriebskosten für die untersuchten Lüftungssysteme, so zeigt sich bei den Investitionskosten ein deutlicher Vorteil des fassadenintegrierten Lüftungssystems gegenüber den innenliegenden Systemen mit ca. 5.000 Euro. Die jährlichen Betriebskosten für die dämmstoffintegrierte Luftverteilung sind jedoch größer als bei den innenliegenden Luftverteilsystemen. Grund hierfür sind der höhere Lüfterstrombedarf und der geringfügig höhere Heizwärmebedarf. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein energieeffizientes und kostengünstiges Sanierungssystem, das mit marktgängigen Lüftungssystemen konkurrieren kann, realisierbar ist.

Am Beispiel zweier viergeschossiger Mehrfamilienhäuser der Gebäudeklasse 4 werden insgesamt zwei zentrale Zu- und Abluftsysteme mit Wärmerückgewinnung und fassadenintegrierter Luftkanalführung konzeptionell entwickelt und einem Lüftungssystem aus wohnungszentralen Lüftungsanlagen gegenübergestellt. Auch hier erfolgt der Vergleich über die in Kapitel 5 vorgestellte gesamtenergetische Bewertung. Bei der Entwicklung der Lüftungssysteme fließen die Lösungsansätze und Planungsempfehlungen für die Konzeptionierung der Luftkanalführung aus Kapitel 6.4 mit ein. So werden nur die Zuluftkanäle in der Fassadenebene verlegt und die Abluftleitungen in den ungenutzten Schornsteinen platziert. Um ein Durchbrechen

des Brandriegels zwischen dem zweiten und dritten Obergeschoss durch die fassadenintegrierten Luftkanäle zu vermeiden, werden die oberen und unteren beiden Etagen jeweils unabhängig voneinander über ein eigenes Lüftungsgerät im Keller und Dachraum versorgt. So ergibt sich ein zentrales 2-Anlagensystem für beide Häuser. In einer weiteren Variante werden die beiden Häuser getrennt voneinander belüftet, sodass ein zentrales System mit vier Lüftungsabschnitten entsteht.

Zunächst werden die Druckverluste im Zuluft- und Abluftkanalnetz aller Lüftungsstränge statisch berechnet und miteinander verglichen, um den zusätzlichen Lüfterstrombedarf zu ermitteln. Das zentrale 2-Anlagensystem führt in den Zu- und Abluftsträngen jeweils zu den höchsten Druckverlusten. Grund hierfür sind die weiten Leitungslängen im Dachboden und Keller und die größeren geförderten Volumenströme im Vergleich zu den kleineren Lüftungsabschnitten der anderen Systeme. Aus dem Gesamtdruckabfall und dem Luftvolumenstrom nach Nennlüftung kann für jeden Lüftungsabschnitt der Betriebspunkt und ein geeigneter Ventilator ausgewählt werden. Das 2-Anlagensystem benötigt für die Luftförderung der zwei Lüftungsabschnitte insgesamt vier Ventilatoren. Für das 4-Anlagensystem sind insgesamt acht Ventilatoren nötig und die 20 Wohnungslüftungsanlagen brauchen jeweils einen Zuluft- und Abluftventilator. Die kleineren Ventilatoren der Wohnungslüftungsgeräte weisen deutlich schlechtere Wirkungsgrade auf als die größeren Ventilatoren der Zentralsysteme. Demzufolge ist auch die Gesamtleistungsaufnahme der Ventilatoren des zentralen 2-Anlagensystems mit 266 W am niedrigsten. Das 4-Anlagensystem weist eine um 57,9 % höhere Anschlussleistung auf und die Wohnungslüftungsanlagen führen zu einer Gesamtleistungsaufnahme, die fast doppelt so hoch ist wie das zentrale 2-Anlagensystem.

Die jährliche Heizwärmeeinsparung, die durch den Einsatz der drei Lüftungssysteme erzielt werden kann, wird mithilfe der gesamtenergetischen Bilanzierung über eine dynamische Gebäudesimulation bestimmt. Das System aus wohnungszentralen Lüftungsanlagen führt mit einer Reduktion von knapp 58 % auf die höchste Heizwärmeeinsparung. Mit den zentralen Lüftungssystemen kann der Heizwärmebedarf im Vergleich zu einer reinen Sanierung der Außenhülle um etwa die Hälfte gesenkt werden. Die Leitungsführung der Wohnungslüftungsanlagen liegen innerhalb der beheizten thermischen Hülle und verursacht dadurch keine Wärmeverluste. Die zentralen Systeme hingegen führen aufgrund der fassadenintegrierten Zuluftkanalführung und der Leitungsführung im Dach- und Kellergeschoss zu Wärmeverlusten. Der Systemwirkungsgrad der zentralen Lüftungsanlagen reduziert sich unter Berücksichtigung der Wärmeabflüsse über die Kanalführung auf etwa 72,5 %.

Die Wirtschaftlichkeit der Lüftungssysteme wird über ein dynamisches Verfahren zur Berechnung der jährlichen Annuitäten nach [VDI 2067] bestimmt. Hierbei werden die Kapitalkosten sowie die bedarfsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten bilanziert. Der Vergleich der Investitionskosten für die unterschiedlichen Lüftungssysteme zeigt, dass die Installation der 20 Wohnungslüftungsanlagen zu den höchsten Kosten führt. Diese enthalten die Material- und Montagekosten für alle Komponenten der Lüftungssysteme wie die Lüftungsgeräte, die Lüftungskanäle und die notwendigen brandschutztechnischen Einrichtungen zur Schottung der Lüftungsabschnitte. Die Kosten für die Verkleidung der innenliegenden Flachkanäle werden jedoch genauso wenig betrachtet wie die Planungskosten der brandschutztechnischen Maßnahmen bei den zentralen Systemen. Stellt man die jährlichen Annuitäten der drei

Lüftungssysteme gegenüber, so führt das zentrale 2-Anlagensystem zu den geringsten Annuitäten. Das Wohnungslüftungssystem zeigt aufgrund der hohen Investitionskosten und des zusätzlichen Hilfsstrombedarfs die höchsten Annuitäten. Der Vergleich der untersuchten Lüftungssysteme verdeutlicht, dass energiesparende und wirtschaftliche Lüftungssysteme mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen auch im Mehrgeschosswohnungsbau möglich sind.

7.5 Weiterentwicklung der Luftkanalführung und baupraktische Optimierung

Aus den Erfahrungen der praktischen Umsetzung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung am Testgebäude in Kassel und den Anwendungsbeispielen im Mehrgeschosswohnungsbau werden im folgenden Abschnitt Weiterentwicklungen für die Dämmstoffkanalplatten erarbeitet. Ziel der Untersuchung ist eine baupraktische Optimierung des Plattendesigns, ohne dabei den Arbeitsaufwand für das Montieren der Wärmedämmplatten zu erhöhen oder das hydraulische und energetische Verhalten negativ zu beeinflussen.

Die am Demonstrationsgebäude eingesetzten dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle sind in expandiertem Polystyrolhartschaum mit Plattenabmaßen von 500 mm x 1.000 mm und einer Plattendicke von 160 mm eingelegt. Durch Aneinanderlegen der jeweiligen Kanaldämmplatten auf Versatz entsteht der vertikale Lüftungskanal, der sich dem Fugenbild der Platten mit senkrecht versetzten Stoßfugen anpasst, sodass keine thermischen Schwachstellen aufgrund von zusätzlichen Kreuzfugen entstehen. Der integrierte Lüftungskanal weist einen freien Querschnitt von 30 mm x 300 mm auf und wird von einer 100 mm dicken Dämmstoffschicht überdeckt. Aus den konzeptionellen Untersuchungen zur fassadenintegrierten Luftkanalführung an vier Beispielgebäuden in Kapitel 6.3 ging hervor, dass die Anordnung der Kanalplatten aufgrund schmaler Wandflächen zwischen den Fenstern im Mehrgeschosswohnungsbau eingeschränkt ist.

Durch die Wahl eines anderen Kanalquerschnitts ändern sich die hydraulischen und energetischen Eigenschaften des Lüftungskanals. Ein schmalere Lüftungskanal vereinfacht die Anordnung der Kanalplatten an der Wandoberfläche von Gebäuden und der geringere wärmeübertragende Umfang des Kanals sorgt für niedrigere Wärmeverluste an die Umgebung. Die Lage des Lüftungskanals innerhalb der Dämmstoffplatten bestimmt die Temperaturentwicklung entlang der Luftkanalführung. Der Einfluss der Dämmstoffüberdeckung auf die Wärmeverluste der Leitungsführung und den Systemwirkungsgrad wurde bereits in Kapitel 5.5.4 analysiert. Aus Stabilitätsgründen und zur besseren Aussteifung des dämmstoffintegrierten Kanals empfiehlt es sich, einen Abstand zur inneren Plattenoberfläche von mindestens 30 mm zu wählen. Die wichtigsten Parameter zur Bestimmung der Plattengeometrie sind in Abb. 106 wiedergegeben. Der freie Lüftungsquerschnitt ergibt sich aus der Kanaltiefe a und der Kanalbreite b und die Gesamtschichtdicke der Kanaldämmplatten beträgt 160 mm.

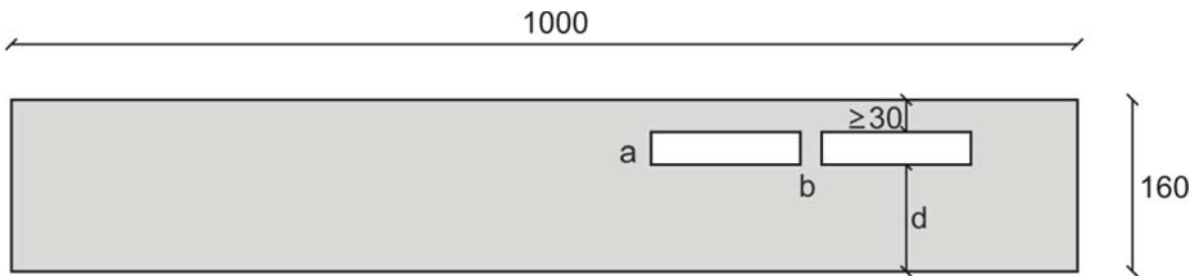



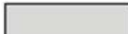
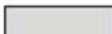




Abb. 106: Schema der Kanaldämmplatte mit integriertem Lüftungskanal

Die Druckverluste der integrierten Lüftungskanäle für einen Rechteckquerschnitt von 30 mm x 300 mm führen bei einem Volumenstrom von 50 m³/h rechnerisch zu einem längenspezifischen Druckverlust von etwa 1 Pa/m. Die experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 4.3.1 bestätigen diese Ergebnisse. Die hydraulischen Eigenschaften entsprechen einem kreisrunden Lüftungsrohr mit einem Innendurchmesser von 90 mm (DN90). Im Folgenden wird die Kanaltiefe *a* des Lüftungskanals schrittweise in 5-mm-Schritten erhöht und gleichzeitig die Kanalbreite *b* soweit verkleinert, dass die spezifischen Druckverluste der neuen Kanalgeometrie dem Ausgangsfall entsprechen. Das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der verbleibenden Kanalbreite *b* bei gegebener Kanaltiefe *a* und definiertem Volumenstrom und spezifischem Druckverlust ist in [Pfluger 2006] beschrieben.

Tab. 15: Druckverlustäquivalente Flachkanäle und verbleibende Dämmstoffüberdeckung für integrierte Kanäle bei einer Dämmstoffstärke von 160 mm bei einem Volumenstrom von 50m³/h und einem längenspezifischen Druckverlust von 1 Pa/m

Kanalgeometrie in [mm]	Einsparung Kanalbreite <i>b</i> in [%]	Überdeckung <i>d</i> ^a in [mm]
 30x300	-	100
 35x237	21	95
 40x195	35	90
 45x166	44,7	85
 50x144	52	80
 80x84	72	50
 DN90	70	40

^a Zur besseren Aussteifung verbleiben 30 mm zur inneren Plattenoberfläche

In Tab. 15 sind die resultierenden druckverlustäquivalenten Flachkanäle sowie die verbleibende Dämmstoffüberdeckung d und die prozentuale Einsparung der Kanalbreite b aufgetragen. Der 20 mm dicke Steg zwischen den beiden Teilkanälen wird nicht dargestellt, da durch Verkleinern der Kanalbreite b auf diesen ohnehin verzichtet werden kann. Wird die Kanaltiefe auf 50 mm erhöht, so kann die Kanalbreite in etwa halbiert werden, ohne dass sich das hydraulische Verhalten des Lüftungskanals verändert. Die Dämmstoffüberdeckung nach außen beträgt dann allerdings nur noch 80 mm anstatt 100 mm. Mit einem nahezu quadratischen Querschnitt kann die Kanalbreite auf etwa 84 mm verkleinert werden, wobei die Wärmeverluste über die nur noch 50 mm dicke Dämmschicht deutlich ansteigen.

Aus den oben dargestellten Betrachtungen empfiehlt sich für den baupraktischen Einsatz der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle ein freier Lüftungsquerschnitt von 40 mm x 195 mm. Die Breite des Kanals reduziert sich im Vergleich zum Ausgangsfall um mehr als ein Drittel. Gleichmaßen ist der Lüftungskanal noch breit genug, um einen präzisen Anschluss der Kernbohrung an den Kanal zu realisieren. Je schmaler der Kanal wird, desto schwieriger wird es, den Kanal mittig anzuzapfen. Die Dämmstoffüberdeckung sinkt bei diesem Kanalquerschnitt von 100 mm auf 90 mm und wirkt sich daher auf das energetische Verhalten der Luftkanalführung aus. Die Wärmeverluste über die Luftkanalführung erhöhen sich etwas und der Systemwirkungsgrad sinkt um wenige Prozentpunkte im Vergleich zur Ausgangsvariante ab.

Die konzeptionelle Analyse der Fassaden- und Außenwandgestaltung typischer Mehrfamilienhäuser hat gezeigt, dass für bestimmte bauliche Situationen, wie bei Loggien und Balkonen, eine ausschließlich vertikale Kanalverlegung nicht möglich ist. Für eine einfachere Planung und flexiblere Verlegung der Lüftungskanäle wird daher eine strömungsoptimierte Umlenkungs- kanalplatte empfohlen. Die spezifischen Druckverluste für diese Umlenkungen sind allerdings noch messtechnisch zu ermitteln. In Abb. 107 ist ein Plattenverbund aus mehreren Dämmstoffpaneelen mit 90°-Umlenkung und einer horizontalen Platte dargestellt.

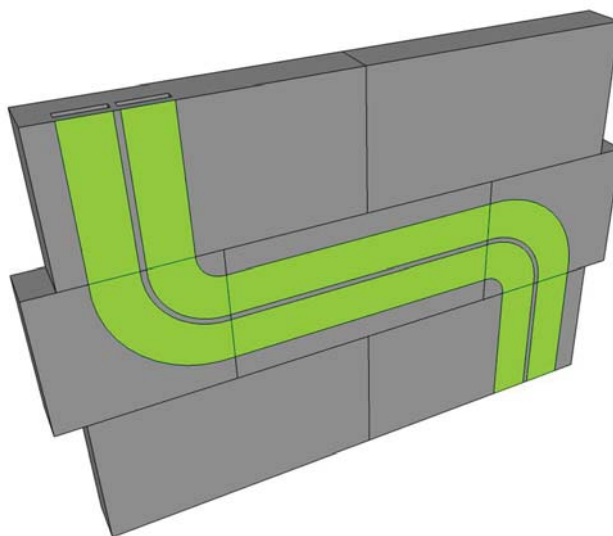


Abb. 107: Erweiterung der fassadenintegrierten Luftkanalführung um eine horizontale Kanalplatte und zusätzliche Umlenkungsplatten für mehr Flexibilität bei der Anordnung der Luftkanäle

7.6 Kritische Auseinandersetzung mit dem Wärmedämmstoff Polystyrol

Polystyrol-Dämmstoffe stehen aufgrund ihres Brandverhaltens, der Wirkung auf Organismen und der Umwelt sowie der späteren Entsorgungsproblematik zunehmend in der Kritik. In diesem Abschnitt sollen die Aspekte Brandschutz, Umwelteinwirkungen und Recycling von Polystyrol kritisch beleuchtet und näher analysiert werden.

In der öffentlichen Berichterstattung wird immer wieder auf das Brandverhalten von Polystyrol eingegangen und der Einsatz als Wärmedämmstoff in großen Wohngebäuden hinterfragt. Grund hierfür sind verschiedene Brandfälle in der Vergangenheit. Polystyrol wird schon bei Temperaturen über 100°C weich und kann im Brandfall entlang der Fassade abtropfen. Dadurch entsteht die Gefahr, dass der Brand sich auf andere Bauabschnitte des Gebäudes ausweiten kann. Speziell im Bereich des Fenstersturzes kann bei dickeren Dämmstoffdicken über 100 mm Stärke das Polystyrol schmelzen und hinter der Putzschicht weiterbrennen. Begünstigt durch den Kamineffekt kann sich im weiteren Verlauf der Brand schnell entlang der Fassade ausbreiten. Die in Kapitel 6.3.3 dargestellten zusätzlichen Maßnahmen für größere Wohnbauten ab der Gebäudeklasse 4 können bei einem Zimmerbrand eine rasche Brandausbreitung auf andere Geschosse unterbinden. Bei vielen der Brandereignisse, die in der medialen Berichterstattung diskutiert wurden, war die Brandursache jedoch kein klassischer Zimmerbrand, der sich vom Inneren des Gebäudes über das Fenster auf die Fassade ausgebreitet hat, sondern entstand durch externe Brandherde. So führte häufig ein brennender Gegenstand, wie beispielsweise ein Müllcontainer, der nahe an der Gebäudefassade stand, zu einem Brand des Gebäudesockels und dadurch zu einem Fassadenbrand. Aus diesem Grund beschloss die Bauministerkonferenz im November 2014 in Chemnitz, Änderungen in den Zulassungsbestimmungen für Polystyrol-Dämmstoffe, insbesondere bei Neubauten, bei Erneuerungen und der nachträglichen Dämmung bestehender Gebäude vorzunehmen. Das Deutsche Institut für Bautechnik gibt Hinweise für die konstruktive Ausbildung von Maßnahmen zur Verbesserung des Brandverhaltens von als „schwerentflammbar“ einzustufenden Wärmedämmverbundsystemen mit EPS-Dämmstoff. Dazu gehören unter anderem *„ein Brandriegel an der Unterkante des WDVS bzw. maximal 90 cm über Geländeoberkante oder genutzten angrenzenden horizontalen Gebäudeteilen (z. B. Parkdächer u. a.)“* [DIBt 2016]. Dieser verhindert, dass sich ein Brand außerhalb des Gebäudes im Bereich des Gebäudesockels auf der Fassade ausbreiten kann.

Expandiertes Polystyrol enthält ein zusätzliches Flammschutzmittel, das die Brandausbreitung verlangsamt. Nur durch die Zugabe eines solchen Mittels gilt der Dämmstoff als schwerentflammbar. Bis vor wenigen Jahren wurde in EPS-Dämmstoffen Hexabromcyclododecan (HBCD) als Additiv eingesetzt, das jedoch umwelt- und gesundheitsschädlich ist und daher als „besonders besorgniserregend“ eingestuft wurde. Die nachgewiesenen negativen Einflüsse auf Mensch und Umwelt führten dazu, dass HBCD nach der EU-Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) innerhalb der Europäischen Union nicht mehr als Flammschutzmittel eingesetzt werden darf [UBA 2017]. In Polystyrol-Dämmstoffen werden seither andere flammenhemmende Zusätze verwendet, wie beispielsweise der Kunststoff Polymer-FR. Diese bromierten Polymere, die mit einem Anteil von ca. 1 % dem Polystyrol zugegeben werden, haben nach bisherigem

Kenntnisstand nicht die problematischen Umwelteigenschaften wie HBCD, da sie dem Polystyrol ähnlich und aufgrund ihrer Größe nicht bioverfügbar sind [UBA 2017].

Die im untersuchten Lüftungskonzept eingesetzten Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum werden im Herstellungsprozess mithilfe eines Treibmittels wie Isopentan oder Pentan aufgeschäumt. Diese Kohlenwasserstoffe sowie weitere flüchtige organische Verbindungen (VOC) können auch im eingebauten Zustand aus dem Dämmstoff ausgasen und die Luftqualität in den Innenräumen beeinflussen. Dies könnte für den Einsatz des Polystyrols als dämmstoffintegrierter Lüftungskanal problematisch sein. In [Hauser und Kaiser 2013] wurden die Ergebnisse eines Prüfkammerversuchs vorgestellt, bei dem die Emissionen aus den Dämmstoffplatten über einen längeren Zeitraum gemessen und analysiert wurden. Ziel der Untersuchung war es zu zeigen, ob eine acht Wochen lange offene und belüftete Lagerung der Dämmstoffplatten ausreicht, damit bei der späteren Nutzung als dämmstoffintegrierter Lüftungskanal keine Stoffkonzentrationen auftreten, von denen eine gesundheitliche Gefahr ausgeht. Die Ergebnisse des Prüfkammerversuchs haben gezeigt, dass schon nach drei Tagen der vom Umweltbundesamt festgelegte Innenraumluftrichtwert für Styrol unterschritten wurde. Nach [Hauser und Kaiser 2013] können die EPS-Platten somit bei ausreichender Lagerung als dämmstoffintegrierte Lüftungskanäle eingesetzt werden, ohne dass eine gesundheitliche Beeinträchtigung durch austretende flüchtige organische Verbindungen entsteht.

Wärmedämmstoffe aus Polystyrol in Gebäuden werden in der Europäischen Union derzeit zu weniger als 10 % recycelt [Schlummer 2015]. Der überwiegende Teil wird durch die Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet oder entsorgt. Die stoffliche Weiterverwendung gestaltet sich schwierig, da Polystyrol eine sehr geringe Schüttdichte aufweist und daher zu hohen spezifischen Transportkosten führt. Das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung hat ein lösungsmittelbasiertes Recyclingverfahren entwickelt, bei dem das Polystyrol direkt auf der Baustelle in einem Lösungsmittel gelöst und Verunreinigungen abgetrennt werden können. So kann neuwertiges Polystyrol mit hoher Qualität gewonnen werden²².

²² Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV)
<https://www.ivv.fraunhofer.de/de/forschung/verfahrensentwicklung-polymer-recycling/recycling-eps-abfall.html>

8 Bewertung des integralen Ansatzes

Luftkanalsysteme aus dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen sind noch weitestgehend unerforscht und wurden bisher nur an wenigen Gebäuden angewendet. Der in dieser Arbeit verfolgte integrale Ansatz zur Weiterentwicklung der innovativen Sanierungslösung mit fassadenintegrierter Luftkanalführung stützt sich auf drei verschiedene Methoden. Mithilfe der Messdatenanalyse an einem Testgebäude werden das Betriebsverhalten und die grundlegende Funktionsweise des Systems erforscht. Die strömungstechnischen Eigenschaften der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle werden durch experimentelle Untersuchungen im Labor geprüft und es werden gezielt Verbesserungen für Anschlussdetails entwickelt. Die gesamt-energetische Bilanzierung des Sanierungssystems zur Vergleichbarkeit mit anderen Lüftungssystemen erfolgt über thermisch hydraulisch gekoppelte Gebäudesimulationen. Am Beispiel typischer Wohngebäude werden dann Planungsempfehlungen für die Konzeptionierung der Luftkanalführung in der Fassade entwickelt, um die Anwendbarkeit der Sanierungslösung an verschiedenen Bestandsbauten nachzuweisen.

Im Rahmen der Messdatenauswertung an einem Demonstrationsgebäude konnten erstmals Kennwerte wie die Rückwärmezahl des Gesamtsystems, die Systemdruckverluste der fassadenintegrierten Luftkanalführung und der zusätzliche Wärmestrom auf Höhe des Lüftungskanals in Abhängigkeit des geförderten Luftvolumenstroms bestimmt werden. Die an der realen Bausubstanz gemessenen Temperaturdaten können auch dazu verwendet werden, das in dieser Arbeit entwickelte instationäre Durchflussmodell zur Abbildung der Lüftungskanäle in der dynamischen Gebäudesimulation zu überprüfen. Außerdem werden für praxisrelevante Fragestellungen, wie die Reinigung der Kanäle und die Inspizierbarkeit der Luftkanalführung anwenderfreundliche Lösungen vorgestellt.

Die strömungstechnischen Untersuchungen an den dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen dienen dazu den bisher unzureichenden Kenntnissen über die hydraulischen Eigenschaften der Dämmstoffkanalplatten entgegenzuwirken. Dazu liefern die experimentellen Messungen aus Kapitel 4 erstmals genaue Druckverlustkennwerte für die im Polystyrolhartschaum integrierten Lüftungskanäle. Anschlussdetails, wie die Verbindung zwischen dem Lüftungskanal und dem Raum sowie notwendige Umlenkungen auf der Fassade, werden ebenso vermessen und über einen Druckverlustbeiwert charakterisiert, wodurch es nunmehr möglich, ist die Luftkanalführung auf der Fassade zu planen, den Druckverlust ganzer Kanalabschnitte zu quantifizieren und geeignete Ventilatoren für die Be- und Entlüftung der jeweiligen Gebäude festzulegen. Die experimentelle Ermittlung der Leckagerate an Dämmstoffkanalplatten soll nachweisen, dass die im Dämmstoff integrierten Lüftungskanäle für den Einsatz in der Lüftungstechnik geeignet sind. Die Messungen zeigen hier, dass mit einem speziellen Dichtband zwischen den Anschlüssen der Kanalplatten deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit nicht abgedichteten Fugen.

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung werden das Gebäude und die im Dämmstoff enthaltenen Luftkanäle in einer thermisch-hydraulisch gekoppelten Gebäudesimulation abgebildet. Das entwickelte Durchflussmodell zur Bestimmung der instationären Wärmevorgänge in den Lüftungskanälen wird über den Vergleich mit realen Messdaten validiert. Die Simulation liefert für das neuartige

Sanierungssystem erstmals eine Methode zur gesamtenergetischen Bilanzierung, sodass das System hinsichtlich des Systemwirkungsgrads, der Wärmeverluste über das Luftkanalnetz, der erreichbaren Energieeinsparung und der sich einstellenden Luftmengen in allen Räumen bewertet werden kann. Des Weiteren ist mithilfe der entwickelten Methode ein Vergleich des Systems mit anderen Sanierungslösungen und herkömmlichen Lüftungssystemen bezüglich energetischer und hydraulischer Gesichtspunkte möglich.

Für die Anwendung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung an größeren Wohngebäuden fehlten bisher geeignete Auslegungsempfehlungen, um die Luftkanalführung auch auf den Mehrgeschosswohnungsbau auszuweiten. Ebenso sind die Systemgrenzen und Hemmnisse, die sich aufgrund der unterschiedlichen Grundriss- und Fassadengestaltung sowie der Brandschutzanforderungen ergeben, momentan noch unbekannt. Durch die konzeptionelle Entwicklung der Luftkanalführung an ausgewählten Beispielgebäuden konnten diese baulichen Abhängigkeiten herausgearbeitet und angepasste Lösungen für verschiedene Anwendungsfälle vorgestellt werden. Insbesondere die Maßnahmen zur Vermeidung von Rauch- und Brandweiterleitung in benachbarte Geschosse und die mithilfe des integralen Ansatzes gewonnenen Lösungen sind wichtig, um den Praxiseinsatz fassadenintegrierter Luftkanalsysteme auch in mehrgeschossigen Gebäuden zu ermöglichen.

Der in dieser Arbeit verfolgte integrale Ansatz zur Weiterentwicklung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung soll nun auch objektiv auf seine Vereinfachungen und Einschränkungen hin überprüft werden. Die Analyse der Messdaten am Testgebäude zeigte, dass die Funktionsweise des Lüftungssystems sehr stark vom Nutzerverhalten der Bewohner abhängt. Durch die Abwesenheit und die dementsprechend verminderte Beheizung des Obergeschosses sind die Zu- und Ablufttemperaturen des Lüftungssystems teilweise stark abgesunken. Eine getrennte Anbindung der beiden Geschosse wäre hier vorteilhaft, um die einzelnen Räume des Gebäudes individuell zu belüften. Zur Bildung von Kennwerten wurden daher auch nur Messdaten verwendet, aus denen hervorging, dass beide Geschosse während der Heizperiode ausreichend temperiert wurden.

Das gewählte Messverfahren zur Bestimmung der Leckagerate der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle konnte nicht abschließend beantworten, ob die Dämmstoffkanalplatten auch bei langen Luftkanalwegen noch ausreichend luftdicht sind, um eine ausreichend große Luftmenge zur Belüftung des Gebäudes zur Verfügung zu stellen. Die Messungen belegen jedoch, dass ein alleiniges Aneinanderlegen der Platten ohne spezielle Abdichtungsmaßnahmen beispielsweise in Form eines Dichtbandes nicht praktikabel ist.

Das für die gekoppelte dynamische Simulation notwendige Modell des Gebäudes ist aufgrund der Vielzahl von Eingabewerten aufwendig und fehleranfällig. Auch die Abbildung der einzelnen Luftkanalstränge im instationären Durchflussmodell ist kompliziert und erfordert genaue Kenntnisse über den geförderten Luftvolumenstrom, die Strömungsform und den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Das Modell wurde bislang nur für den Einsatz dämmstoffintegrierter Lüftungskanäle gemäß dem Aufbau am Testgebäude validiert. Bei anderen Dämmschichtaufbauten und Materialien sollte der Modellansatz nochmals neu bewertet werden.

Bei der Planung der Luftkanalführung auf der Fassade muss jedes Gebäude individuell betrachtet werden. Die im Rahmen dieser Untersuchung erarbeiteten Planungsempfehlungen liefern für die

meisten Anwendungsfälle im Wohnungsbau wichtige Hinweise für die Konzeptionierung der Luftkanalnetze. In den letzten Jahren sind zunehmend Brandfälle im Zusammenhang mit Wärmedämmverbund-Systemen aufgetreten. Aus diesem Grund sollten die identifizierten Brandschutzlösungen, wie dem punktuellen Durchbrechen des Brandschutzriegels, mithilfe von geeigneten Brandversuchen überprüft und deren Wirksamkeit nachgewiesen werden. Insbesondere für den Einsatz im Mehrgeschosswohnungsbau ist ein geprüftes Brandschutzkonzept unerlässlich.

9 Zusammenfassung

Die energetische Sanierung des deutschen Wohngebäudebestands ist ein wichtiger Baustein, um die klimapolitischen Ziele Deutschlands zu erreichen. Dafür werden energieeffiziente und kostengünstige Sanierungssysteme benötigt, die einen großen Beitrag dazu leisten können, die Sanierungsrate zu steigern. Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines neuartigen Fassadensanierungssystems für die nachträgliche Installation zentraler Lüftungstechnik im Wohngebäudebestand. Der innovative Ansatz sieht vor, die Luftkanalführung zur Erschließung aller Räume über die Fassade zu realisieren. Dazu sind die luftführenden Kanäle direkt in den anzubringenden Dämmplatten integriert, sodass die Funktionen Wärmedämmung und Luftkanalführung in einer Konstruktion vereint sind. Ein Fassadensanierungssystem mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen kann den Energiebedarf bestehender Gebäude erheblich senken und verspricht durch die Minimierung der Lüftungswärmeverluste durch die Nutzung von Wärmerückgewinnung ein zusätzliches Energieeinsparpotential. Außerdem entsteht durch den Wegfall der innenliegenden Leitungsführung ein Kostenvorteil im Vergleich zu konventionellen Lüftungssystemen.

Bisher weitestgehend unbekannt sind die grundlegende Funktionsweise und das Betriebsverhalten eines Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung sowie das hydraulische und wärmetechnische Verhalten der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle. Darüber hinaus konnte die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems noch nicht in einer gesamtenergetischen Bilanzierung nachgewiesen werden. Aus diesen zentralen Fragestellungen zur Weiterentwicklung des Sanierungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung leitet sich auch die methodische Vorgehensweise der Arbeit ab.

Zunächst werden die verfügbaren Lüftungssysteme auf ihren Einsatz im Gebäudebestand hin überprüft und die normativen Anforderungen und Kriterien in technischen Regelwerken auf den innovativen Ansatz hinübertragen sowie um die Aspekte für Systeme mit fassadenintegrierter Luftkanalführung ergänzt. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde an einem Testgebäude ein Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftführung installiert. Die dort über ein Monitoring-system erhobenen Daten werden über eine messtechnische Analyse ausgewertet und das Betriebsverhalten ausführlich untersucht. Die daraus gewonnenen Kenntnisse werden für die Weiterentwicklung des Gesamtsystems und die Überprüfung des Simulationsmodells benötigt. Zur detaillierten Bestimmung der noch unbekanntenen hydraulischen Kennwerte werden die im Dämmstoff integrierten Lüftungskanäle über experimentelle Untersuchungen im Strömungslabor detailliert vermessen. Dies dient dazu, den Druckverlust der Luftleitungen quantifizieren zu können und das passende Lüftungsgerät für das Gebäude auszuwählen. Schließlich wird ein Modell der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle entwickelt, um das Gebäude inklusive der fassadenintegrierten Luftkanalführung in einer gesamtenergetischen Bilanzierung bewerten zu können. Mithilfe des entwickelten Simulationsmodells können dann herkömmliche Lüftungssysteme der neuartigen Sanierungslösung gegenübergestellt werden. Zur Anwendung des Sanierungssystems auch auf größere mehrgeschossige Gebäude werden die baulichen Abhängigkeiten und einschränkenden Faktoren für die Luftkanalführung eingehend analysiert und passende Lösungen für ausgewählte Beispielgebäude identifiziert. Anschließend folgt noch eine baupraktische Optimierung der Luftkanalführung in der Fassade auf Basis der gewonnenen

Erkenntnisse. Die mit dem oben beschriebenen Vorgehen erzielten Ergebnisse werden nachfolgend zusammengestellt.

Die derzeit für den Gebäudebestand verfügbaren Lüftungssysteme lassen sich in freie und ventilatorgestützte Systeme unterteilen. Bei freier Lüftung hängt der Luftwechsel stark von den anliegenden Temperatur- und Winddruckbedingungen ab, sodass der resultierende Luftvolumenstrom nicht regelbar ist und einen zusätzlichen Eingriff des Nutzers erfordert. Mechanische Lüftungssysteme verwenden zur Luftbeförderung Ventilatoren und je nach Bauweise kann durch die Nutzung von Wärmerückgewinnung ein Teil der in der Abluft enthaltenen Wärme dem Gebäude zurückgeführt werden. Zu- und Abluftsysteme mit Wärmerückgewinnung werden zur Belüftung einzelner Räume in dezentralen Geräten oder für die Nutzung in einer oder in mehreren Wohneinheiten in zentralen Systemen verwendet. Häufig installierte Systeme sind Wohnungslüftungsanlagen mit innenliegender Leitungsführung aus Flachkanälen. Diese Anlagen weisen hohe Wärmerückgewinnungsgrade auf, führen allerdings auch zu hohen Investitionskosten. Dezentrale Lüftungssysteme, die beispielsweise auf dem Pendellüfterprinzip beruhen, sind kostengünstiger. Nachteile sind jedoch die Schallimmissionen und der hohe Wartungsbedarf der Geräte.

Die Analyse der technischen Regeln und Normenwerke für mechanische Lüftungssysteme in Gebäuden zeigt, dass Anforderungen und Kriterien für Systeme mit fassadenintegrierter Luftkanalführung derzeit fehlen. Aus diesem Grund wurden die entsprechenden technischen Regel- und Normenwerke um weitere Kriterien für Systeme mit fassadenintegrierter Luftkanalführung ergänzt. Dies betrifft beispielsweise die Berechnung und Bewertung der Lüftungswärmeverluste über die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und die Bilanzierung des Systemwirkungsgrades der Lüftungsanlage einschließlich der Luftkanalführung. Außerdem sind die hydraulischen Eigenschaften der im Dämmstoff angeordneten Luftkanäle aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit nicht bekannt, ebenso wenig wie der Druckverlust der Anschlüsse und Umlenkungen. In Bezug auf die akustischen Eigenschaften des Systems ist die Wirkung der fassadenintegrierten Luftkanalführung auf die Schalldämmung der Außenwand von Bedeutung und die Schalldämpfung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle. Die hygienischen Aspekte der neuartigen Leitungsführung müssen Möglichkeiten zur Reinigung und regelmäßigen Inspektion der Luftkanalführung umfassen. Bezüglich des Brandschutzes sind Maßnahmen zur Verhinderung der Rauchentwicklung und Brandweiterleitung über das fassadengeführte Luftkanalnetz zu entwickeln.

An einem Testgebäude in Kassel wurde im Rahmen dieser Arbeit das Betriebsverhalten eines Fassadensanierungssystems mit dämmstoffintegrierter Luftkanalführung über einen Zeitraum von mehreren Jahren messtechnisch analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass unter Berücksichtigung der fassadenintegrierten Luftkanalführung mittlere System-Rückwärmehzahlen von etwa 60 % erreicht werden können. Da die am Testgebäude eingesetzten Kanaldämmplatten kein Nut-und-Feder-System aufweisen, ist für weitere baupraktische Einsätze mit höheren Rückwärmehzahlen zu rechnen. Aufgrund der vermuteten Leckagen in den Luftkanalsträngen weichen die erreichbaren Luftvolumenströme in der Zuluft- und Abluftkanalführung stark von den Auslegungswerten ab. Die dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle verändern den Wärmefluss im Bereich des Außenwandquerschnitts und stellen daher eine Wärmebrücke dar. Je nach Höhe des geförderten Luftvolumenstroms bzw. der Lüftungs-

betriebsstufe stellen sich unterschiedlich hohe Wärmeverlustkoeffizienten ein. Für die Lüftung zum Feuchteschutz beträgt der ψ -Wert 0,01 W/(mK) und steigt bei Intensivlüftung auf einen Wert von 0,05 W/(mK) an. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient bei Nennlüftung liegt bei 0,04 W/(mK). Während der betrachteten Zeiträume innerhalb der Heizperiode kann Tauwasserausfall im Luftkanalnetz aufgrund der gemessenen relativen Luftfeuchte ausgeschlossen werden. An den Messstellen im Zuluft- und Abluftkanalnetz beträgt die mittlere relative Luftfeuchtigkeit zwischen 45 % und 60 %. Kurzzeitige Lastspitzen werden durch den konstanten Luftvolumenstrom schnell wieder abgeführt. Die Gefrierschutzregelung schützt den Wärmeübertrager des Zentralgeräts vor Vereisung. Ab Außenlufttemperaturen unterhalb von 3°C wird der Zuluftventilator ausgeschaltet, um den Wärmetauscher mit der warmen Abluft aufzuwärmen. Die Frostschutzregelung führt bei langen Zeitabschnitten mit tiefen Außenlufttemperaturen zu einem Intervallbetrieb und verhindert eine kontinuierliche Frischluftzufuhr in die Wohnräume. Eine Lösung dieser Problematik könnte mit dem nachträglichen Einbau einer Defrosterheizung erreicht werden. Nach vier Betriebsjahren erfolgte die Kontrolle der dämmstoffintegrierten Luftkanäle mit einem Videoinspektionssystem. Die vertikalen Kanäle können über den Innenraum inspiziert und gereinigt werden. In den Zuluftleitungen sind keine Verschmutzungen oder Beschädigungen zu erkennen. In den Abluftleitungen sammeln sich Staubablagerungen und Spinnenweben, die jedoch mit einem passenden Abluftfilter am Tellerventil verhindert werden können.

Zur Bestimmung der bisher unbekanntenen hydraulischen Eigenschaften der Kanaldämmplatten werden experimentelle Untersuchungen im Strömungslabor durchgeführt. Dazu wird der Druckverlust der geraden Lüftungskanäle und ausgewählter Anschlüsse, die für die Luftkanalführung auf der Fassade notwendig sind, ermittelt. Die Kanaldämmplatten führen auf längenspezifische Druckverluste von 1 Pa/m und weisen dabei gleiche hydraulische Eigenschaften auf wie Lüftungskanäle aus Blech mit gleicher Geometrie. Der gemessene Druckverlust entspricht einem kreisrunden Rohr mit einem Nenndurchmesser von 90 mm.

Bei den untersuchten Anschlussstücken handelt es sich um ein Kniestück, eine 90°-Umlenkung und ein Wandanschlussstück zur Anbindung des vertikalen Lüftungskanals an den Raum. Die Messung des Kniestücks führt auf einen Umlenkungswiderstandsbeiwert von 1,93. Tabellenwerte für Kniestücke mit ähnlicher Geometrie liegen bei etwa 1,16. Das Wandanschlussstück ist unsymmetrisch und zeigt je nach Durchströmungsrichtung unterschiedlich hohe Druckverluste. Für die Anwendung als Zuluftkanal führt die Messung auf einen Umlenkungswiderstandsbeiwert von 3,14 und in umgekehrter Durchströmung im Falle eines Abluftkanals auf einen Wert von 5,57. Bei der Durchführung des Kunststoffrohrs in der Außenwand empfiehlt es sich das Rohr bündig an den dämmstoffintegrierten Kanal anzuschließen, sodass keine Kante in den Lüftungskanal ragt. Die Messung der Luftdichtigkeit der Kanaldämmplatten zeigt, dass ein loses Aneinanderlegen der Kanalplatten trotz des Nut-und-Feder-Systems nicht ausreicht, um einen luftdichten Anschluss zu gewährleisten. Eine Abdichtung zwischen den Kanälen mit doppelseitig klebendem zweispurigem Dichtband zeigt den geringsten Leckagevolumenstrom.

Zur gesamtenergetischen Bewertung des Sanierungssystems wird ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Wirkung der fassadenintegrierten Luftkanalführung auf das thermische und hydraulische Verhalten des Gebäudes analysiert werden kann. Dazu wird zunächst das Testgebäude in Kassel detailliert in einem Gebäudemodell abgebildet und für die Bestimmung der Luftmengen in den Räumen des Gebäudes ein Luftknotenmodell gewählt, um

den Einfluss der wetterabhängigen Temperatur- und Druckgradienten auf die hydraulische Luftverteilung abzuschätzen. Für die in der Fassadenebene liegenden Lüftungskanäle wird in dieser Arbeit ein instationäres Durchflussmodell entwickelt, um die Temperaturentwicklung und die Wärmeverluste der Leitungsführung quantifizieren zu können. Das dynamische Modell wird über den Vergleich mit realen Temperaturmessdaten am Gebäude validiert und überprüft.

Der berechnete Heizwärmebedarf des Gebäudes reduziert sich durch die baulichen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zum Ausgangszustand um etwa die Hälfte und die zusätzliche Energieeinsparung, die durch Nutzung des zentralen Lüftungssystems mit fassadenintegrierter Luftkanalführung erzielt werden kann, beträgt für das Zweifamilienhaus in Kassel 32 %. Die Ergebnisse der Luftströmungssimulation mithilfe des Knotenmodells zeigen, dass nach Einjustieren der Luftmengen an den Ventilen der Räume eine gleichmäßige Luftverteilung gemäß den Auslegungswerten erreicht werden kann. Im Vergleich zu einer statischen Berechnung ergibt sich in der dynamischen Simulation ein nahezu gleicher Systemdruckverlust im Zuluft- und Abluftstrang des Lüftungssystems. Die Luftkanäle in der Fassade führen während des Betriebes der Lüftungsanlage zu Wärmeverlusten, die sich auf die Effizienz des Gesamtsystems auswirken. Bilanziert man diese Wärmeabflüsse über die Luftkanalführung, so erhält man bei einer Dämmstoffüberdeckung von 10 cm einen Systemwirkungsgrad für das Lüftungssystem von 73,3 %.

Um die Frage zu beantworten, ob das Fassadensanierungssystem mit integrierter Luftführung auch auf größere Gebäude, wie den Mehrgeschosswohnungsbau, angewendet werden kann, wird eine Potentialanalyse des deutschen Wohngebäudebestands durchgeführt. Die Analyse zeigt, dass insbesondere Mehrfamilienhäuser der 1950er bis 1970er Jahre für die energetische Sanierung der Außenfassade geeignet sind. Diese Gebäude weisen im Ausgangszustand hohe Energiebedarfe auf und die meist schlichten Putzfassaden können ohne Denkmalschutzauflagen mit WDV-Systemen ertüchtigt werden. Unter Verwendung von vier Beispielgebäuden der Gebäudeklasse 1-4 werden einschränkende Faktoren für die Luftkanalführung wie bauliche Abhängigkeiten und brandschutztechnische Anforderungen identifiziert und daraus konzeptionelle Lösungen entwickelt. Eine vielversprechende Lösung für die Luftkanalverlegung stellt die getrennte Anbindung der Geschosse über das Dachgeschoss und den Keller dar. So können nicht nur die Kanallängen auf der Fassade reduziert, sondern auch eine flexiblere Verlegung ermöglicht werden. Brandschutztechnische Maßnahmen zum Erhalt der Schwerentflammbarkeit bei WDV-Systemen, wie beispielsweise ein umlaufender Brandriegel, müssen so nicht durchbrochen werden. Ein Teil der Luftkanalführung kann bei vielen mehrgeschossigen Gebäuden auch über stillgelegte Schächte angeordnet werden. Dazu werden flexible Rohre in die Schornsteine eingezogen. Beim Anschluss mehrerer Räume unterschiedlicher Nutzungseinheiten an einen Kanal muss die Rauch- und Brandweiterleitung mithilfe von Brandschutzklappen verhindert werden.

Die entwickelte gesamtenergetische Bewertungsmethodik für ein Sanierungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung wird an zwei verschiedenen Gebäuden angewendet und jeweils konventionellen Lüftungssystemen mit innenliegender Luftkanalführung gegenübergestellt. Die unterschiedlichen Systeme werden dann hinsichtlich hydraulischer und energetischer Gesichtspunkte miteinander verglichen sowie die Investitions- und Betriebskosten bestimmt.

Das am Demonstrationsgebäude in Kassel, einem Zweifamilienhaus der Gebäudeklasse 1, umgesetzte Lüftungssystem mit dämmstoffintegrierten Lüftungskanälen wird zwei Lüftungsanlagen und konventioneller innenliegender Luftkanalführung gegenübergestellt. Die im unbeheizten Keller und den Innenräumen verlegten Lüftungskanäle der Referenzsysteme führen zu etwa halb so hohen Wärmeverlusten wie bei der fassadenintegrierten Luftkanalführung, sodass der Heizwärmebedarf nach der Sanierung etwa 3 % niedriger ist. Aufgrund der deutlich höheren Systemdruckverluste bei der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung liegt der zusätzliche jährliche Hilfsstrombedarf fast doppelt so hoch wie bei den Referenzsystemen. Betrachtet man die Investitionskosten für alle Systeme, so beträgt die Kostenersparnis für die Installation der fassadenintegrierten Luftkanalführung gegenüber der innenliegenden Leitungsführung etwa 5.000 Euro pro Gebäude.

Ein Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung an zwei Mehrfamilienhäusern der Gebäudeklasse 4 wird mit einem Referenzsystem aus 20 Wohnungslüftungsanlagen verglichen. Das zentrale System besteht aus mehreren Lüftungsabschnitten und Lüftungsgeräten, die im Keller und auf dem Dachboden aufgestellt sind. Die Zuluftkanalführung wird über die Fassade realisiert und die Abluftkanäle sind in den bestehenden Schächten des Gebäudes integriert. Die Bewertung über die gesamtenergetische Bilanzierung zeigt, dass sich der Heizwärmebedarf der beiden Gebäude durch die Sanierung der Außenwand und den Austausch der alten Fenster um knapp zwei Drittel reduzieren lässt. Durch den Einsatz der Lüftungssysteme kann der jährliche Energiebedarf nochmals halbiert werden, wobei die Einsparung beim Wohnungslüftungssystem aufgrund der innenliegenden Luftkanalführung etwas höher ist als beim zentralen Lüftungssystem. Die längeren Leitungsstränge am zentralen Lüftungssystem führen zu höheren Druckverlusten als beim Referenzsystem. Der Gesamtleistungsbedarf für die Luftbeförderung ist jedoch, bedingt durch den höheren Wirkungsgrad der Ventilatoren, geringer als bei den dezentralen Systemen. Aus diesem Grund ist der jährliche Hilfsstrombedarf für das zentrale Lüftungssystem auch nur etwa halb so hoch wie für die kleinen Wohnungslüftungsanlagen. Unter Berücksichtigung der Kosten für Investition, Energiebezug und Betrieb ist das zentrale Lüftungssystem mit fassadenintegrierter Luftkanalführung gegenüber dem Referenzsystem wirtschaftlicher.

Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur Weiterentwicklung des Sanierungssystems, bestehend aus der messtechnischen Analyse an einem Testgebäude, der hydraulischen Bewertung der dämmstoffintegrierten Luftkanäle und der gesamtenergetischen Bilanzierung über gekoppelte Systemsimulationen an zwei Fallbeispielen, wird der Nachweis geliefert, dass ein energieeffizientes und kostengünstiges System zur nachträglichen energetischen Sanierung von bestehenden Wohngebäuden realisiert werden kann.

Für eine erfolgreiche Markteinführung des neuartigen Lüftungssystems besteht noch weiterer Handlungsbedarf hinsichtlich der Produkt- und Systemprüfung. So wird noch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Gesamtsystems benötigt. Dafür müssen unter anderem noch Brandversuche durchgeführt werden, um die Rauchweiterleitung und den Brandüberschlag zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten zu unterbinden. Für eine einfachere und flexiblere Verlegung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle empfiehlt es sich, die Kanalbreite bei mehrgeschossigen Gebäuden auf einen Querschnitt von 40 mm x 200 mm anzupassen. Die Vorfertigung einer zusätzlichen horizontalen Kanaldämmplatte sowie einer strömungsgünstigen

Umlenkung würde außerdem eine einfachere Montage sowie eine höhere Qualität bei der Verlegung der Dämmplatten auf der Baustelle ermöglichen.

Literaturverzeichnis

DIN 4109: 1989-11: Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise.

DIN 1946-2: 1994-01: Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln).

DIN 4102-1: 1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

DIN EN 12207: 2000-06: Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Klassifizierung.

DIN EN 13829: 2001-02: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren.

DIN EN 12237: 2003-07: Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech.

DIN 4701-10: 2003-08: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.

DIN EN 12792: 2004-01: Lüftung von Gebäuden - Symbole, Terminologie und graphische Symbole.

DIN EN ISO 7730: 2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.

DIN EN 1507: 2006-07: Lüftung von Gebäuden - Rechteckige Luftleitungen aus Blech - Anforderungen an Festigkeit und Dichtheit.

DIN EN 12097: 2006-11: Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Anforderungen an Luftleitungsbauteile zur Wartung von Luftleitungssystemen.

DIN EN 15251: 2007-08: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

DIN EN 15239: 2007-08: Lüftung von Gebäuden - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen.

DIN EN 13779: 2007-09: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen Klimaanlage und Raumkühlssysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007.

DIN EN 13053: 2007-11: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten.

DIN EN ISO 10211: 2008-04: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen.

DIN 1946-6: 2009-05: Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandsetzung.

- DIN 4719: 2009-07: Lüftung von Wohnungen – Anforderungen, Leistungsprüfungen und Kennzeichnung von Lüftungsgeräten.
- DIN EN 13501-1: 2010-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.
- DIN EN 13501-2: 2010-02: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.
- DIN EN 13141-7: 2011-01: Lüftung von Gebäuden - Leistungsprüfungen von Bauteilen/Produkten für die Lüftung von Wohnungen - Teil 7: Leistungsprüfung von mechanischen Zuluft- und Ablufteinheiten (einschließlich Wärmerückgewinnung) für mechanische Lüftungsanlagen in Wohneinheiten (Wohnung oder Einfamilienhaus).
- DIN V 18599-2: 2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- DIN V 18599-10: 2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- DIN 4108-4: 2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- DIN 1319-3: 2010-05: Grundlagen der Messtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit.
- VDI 3733: 1996-07: Geräusche bei Rohrleitungen.
- VDI 2081: 2001-07: Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumluftechnischen Anlagen.
- VDI 6022: 2006-04: Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte.
- VDI 2087: 2006-12: Luftleitungssysteme Bemessungsgrundlagen.
- VDI 3803: 2010-02: Zentrale Raumluftechnische Anlagen Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln).
- VDI 4100: 2012-02: Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz.
- VDI 2067: 2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.
- VDI 2087: 2006-12: Luftleitungssysteme - Bemessungsgrundlagen
- Alsen, N. (2017): Energetische und wirtschaftliche Bewertung von dezentralen Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen; Dissertation. Universität Kassel, Fachgebiet technische Gebäudeausrüstung, 2017

- Alsen, N.; Dettner, M.; Giesen, M.; Klimmt, T.; Knissel, J. (2018): Einsatz dezentraler Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen raumlufttechnischen Anlagen insbesondere in Nichtwohngebäuden; Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt 03ET1200A; Universität Kassel, Fachgebiet technische Gebäudeausrüstung, 2018
- ARGE Bau (2008): Musterbauordnung (MBO).
- ARGE Bau (2010-07): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen (Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie) (M-LüAR).
- ASR (2012): Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A3.6 Lüftung.
- Baumgarth, S.; Hörner, B.; Reeker, J. (2003): Handbuch der Klimatechnik Band 2: Anwendungen. 4., völlig neu bearb. Aufl. Karlsruhe: Müller.
- BBR (2011): Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Hg. v. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn.
- Beutler, F.; Stettler, C. (2012): Wärmerückgewinnung in RLT-Anlagen. In: *Haustech* (Nr.12).
- Blume, D.; Ludwig, S.; Otte, J.; Feist, W. (2001): Das kostengünstige mehrgeschossige Passivhaus in verdichteter Bauweise. Anforderungen an kostengünstige, passivhausgeeignete MFH-Lüftungsanlagen und Überprüfung am Pilotprojekt. Stuttgart: IRB-Verlag.
- BMVBS (2012): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäude. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- BMWi (2013): Energiewende auf Erfolgskurs. Maßnahmen für eine sichere, bezahlbare und umweltschonende Energieversorgung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin.
- Böckh, P. von; Wetzel, T. (2011): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 4., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer Berlin (Springer-Lehrbuch).
- Born, R.; Loga, T.; Diefenbach, N. (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Böswirth, L.; Bschorer, S. (2012): Technische Strömungslehre. Lehr- und Übungsbuch ; mit 43 Tabellen. 9., überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg et Teubner (Studium).
- Bosy, B. (2014): Wärmerückgewinnung - WRG. Online verfügbar unter <http://www.bosy-online.de/Raumlufttechnik/Waermerueckgewinnung-WRG.htm>, zuletzt geprüft am 25.02.2014.
- Burkert, G. (2010): Welcher Wärmebereitstellungsgrad ist der Richtige? In: *Bauen + Energie* (Mai 2010), S. 52–54.
- Dascalaki, E.; Santamouris, M.; Argiriou, A.; Helmis, C.; Asimakopoulos, D.; Papadopoulos, K.; Soilemes, A. (1995): Predicting single sided natural ventilation rates in buildings. In: *SolarEnergy* Vol.55 (No. 5), S. pp 327-341.

- Dena (2016): Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.
- DIBt (2013): Bauregelliste A, Bauregelliste B und C, Deutsches Institut für Bautechnik zuletzt geprüft am 22.07.2014.
- DIBt (2016): Alternative Brandschutzmaßnahmen für Wärmedämmverbundsysteme mit EPS-Dämmstoffen. Mitteilung des DIBt. Berlin. Stand: 28.06.2016
- Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand.
- EnEV (2009): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 16. November 2001, Bundesgesetzblatt, (2001) Teil 1, S. 3085 ff., vom 2. Dezember 2004, Bundesgesetzblatt, (2004) Teil 1, Nr. 64, S. 3146–3162, 7. 12. 2004. vom 24. Juli 2007, Bundesgesetzblatt, (2007) Teil 1, Nr. 34, S. 1519–1563, 26. 7. 2007. vom 29. April 2009, Bundesgesetzblatt, (2009) Teil 1, Nr. 23, S. 954–989, 30. 4. 2009, vom 29.04.2009.
- Erhorn, H. (2008): Gebäudesanierung – Potentiale der Zukunft, Gebäude – Update: Marktchancen der Sanierung mit vorgefertigten Bauteilen. Kassel.
- Europäische Union (2010): EUROPA 2020. Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum. Brüssel.
- Fachverband Gebäude-Klima e. V. (2011): FGK-Statusbericht 18 Wohnungslüftung. Bietigheim.
- Fanger, P. O. (1994): Mensch und Raumklima in: Raumklimotechnik, Bd. 1 Grundlagen. 16. Aufl. Hg. v. H. Esdorn: Springer Verlag.
- Feist, W. (2006): Lüftung und Luftfeuchtigkeit – Zusammenhänge verständlich erklärt. 10. Passivhaustagung. Passivhaus Institut. Online verfügbar unter http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Lueftung_Luftfeuchte.html.
- Fitzner, K. (2013a): Messung von Volumenströmen in Luftleitungen hinter Störstellen Teil 1. In: *HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik* Bd. 64 (Nr. 8).
- Fitzner, K. (2013b): Messung von Volumenströmen in Luftleitungen hinter Störstellen Teil 2. In: *HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik* Bd. 64 (Nr. 9).
- GAP-Solution (2009): Solarwabenfassade "Dämmen mit Licht!". Online verfügbar unter <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien764.pdf>, zuletzt geprüft am 09.01.2014.
- Geißler, A.; Hauser, G. (2002): Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports. Universität Kassel. Kassel.
- Glück, B. (1988): Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung. Druckverluste. VEB Verlag für Bauwesen 1988. Berlin
- Greml, A.; Kapferer, R.; Leitzinger, W. (2011): SFP von Lüftungsanlagen. Komfortlüftungsinfo Nr. 24. Hg. v. komfortluftung.at.

- Häupl, P.; Homann, M.; Kölzow, C.; Riese, O.; Maas, A.; Höfker, G. et al. (2013): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 7., vollst. überarb. und aktual. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer.
- Hauser, G. (2008): Wärmedämmelement mit Lüftungskanälen. Angemeldet durch Fraunhofer-Gesellschaft am 2008. Anmeldenr: PCT/EP2008/004372. Veröffentlichungsnr: WO2008145402 A2.
- Hauser, G.; Kaiser, J. (2013): Dämmstoffintegrierte Kanäle für zentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. In: *Bauphysik* 35, 2013 (Heft 6), S. 367–376.
- Hauser, G.; Kempkes, C. (2005): Der Einfluss von windinduzierten Druckschwankungen auf das thermisch-hygrische Verhalten von durchströmten Leckagen. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e. V. Kassel.
- Hegner, H.-D.; Vogler, I. (2002): Energieeinsparverordnung EnEV - für die Praxis kommentiert. Wärmeschutz und Energiebilanzen für Neubau und Bestand; Rechenverfahren, Beispiele und Auslegungen für die Baupraxis. Berlin: Ernst.
- Heinemann (2013): Technischer Produktkatalog. Vallox Komfortlüftungs-Systeme mit Wärmerückgewinnung.
- Heinemann (2014): Preisliste Lüftung. Online verfügbar unter http://www.heinemann-gmbh.de/fileadmin/Dateien/PDF/Produktkatalog_2.0-2014_v12_interaktiv.pdf.
- Heinz, E. (2009): Planung Lüftungstechnischer Maßnahmen nach neuer DIN 1946-6 (Teil1). In: *Moderne Gebäudetechnik* (5/2009).
- Heinz, E. (2011): Wohnungslüftung - frei und ventilatorgestützt: Anforderungen, Grundlagen, Maßnahmen, Normenanwendung: Beuth Verlag GmbH. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=VQ1dmh5ER-MC>.
- HeizAnIV (1978): Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen (Heizungsanlagen-Verordnung) vom 22. September 1978, Bundesgesetzblatt, (1978) S. 1581 ff.
- Helios (2011): RenoPipe - Das unsichtbare Luftverteilsystem für die Sanierung. Wohnraum-Sanierungslösung. Villingen-Schwenningen.
- Ihle, C.; Bader, R.; Golla, M. (2011): Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung ; Anlagentechnik SHK, Ausbildung und Praxis; Netzmeister, -monteure. 8. Aufl. Troisdorf: Bildungsverl. EINS.
- Ilg, K. (2013): Gas-Durchflussmessung mit Lamina-Flow-Elementen.
- InVENTer (2013): Effiziente Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung. Online verfügbar unter <http://www.inventer.de/produkte/inventer-lueftungssysteme/>.
- IS-Argebau (2005): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR). Hg. v. Bundesbauministerkonferenz.

- Klimapartner (2012): Luftleitungen und Formteile Preisliste. Klimapartner Haustechnische Handels GmbH.
- Klimmt, T. (2018): Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Volumenstromregelung mittels dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen; Dissertation. Universität Kassel, Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, 2018
- Kobler, R.; Binz, A.; Steinke, G.; Höfler, K.; Geier, S.; Aschauer, J. (2011): Retrofit Module Design Guide. Hg. v. EMPA, Building Science and Technology Lab. IEA ECBCS Annex 50.
- Kotthoff, I. (2009): Technische Systeminfo 6 WDV-Systeme zum Thema Brandschutz.
- Krause, M.; Stiegel, H.; Schalk, K.; Schimmel, S. (2013): Energieoptimiertes Bauen: Entwicklung von vorgefertigten, multifunktionalen Systemen zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden.
- Leusden, F.; Freymark, H. (1951): Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch. In: *GI Gesundheits-Ingenieur* (16), S. 271–273.
- Luft, J. (2009): Energieeinsparung in RLT-Anlagen. Dichtheitsprüfung von Luftleitungen in der Praxis - Dichtheit und Hygiene, Erkenntnisse und neue Normen. Hg. v. ISH 2009. Lindab GmbH. Bargteheide.
- Maas, A. (1995): Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. Fachgebiet Bauphysik.
- Meinert, M.; Hollenbeck, P.; Boiting, B. (2013): Druckverluste in Lüftungskanälen. Problematik der Bestimmung mittels Widerstandsbeiwerten. In: *HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik* Bd. 64, S. 30–34.
- Moody, L. Ferry (1944): Friction Factors for Pipe Flow. In: *Transactions of the A.S.M.E.* 66, S. 671–684.
- Münzenberg, U.; Weithaas, T.; Thumulla, J. (2003): Luftwechsel im Gebäudebestand. Fensterlüftung und die Notwendigkeit von Lüftungskonzepten. Hg. v. 7. Pilztagung des VDB. VDB Berufsverband deutscher Baubiologen e. V. Stuttgart.
- Mürmann, H. (2006): Wohnungslüftung. Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Müller.
- Ochs, F.; Dermentzis, G. (2014): Facade integrated active components in timber-constructions for renovation - a case study. NSB 2014 10th Symposium on Building Physics. Lund, Sweden.
- Orme, M.; Liddament, M.; Wilson, A. (1998): Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations, Coventry GB. In: *Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*,
- Ornth, W. (2009): Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand, Berlin. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Passivhaus Institut (2014): Qualitätsanforderungen an Passivhäuser. Luftdichtheit des Gebäudes. Online verfügbar unter http://www.passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm, zuletzt geprüft am 29.01.2014.

- Paul, E. (2002): Vereisung von Wärmerückgewinnungsgeräten - Methoden zur Vermeidung. In: *IKZ-Haustechnik* (9), S. 28 ff.
- Peikos, A. (2013): Analyse des vorbeugenden baulichen Brandschutzes bei Verwendung des Fresh-Air-Wall-Systems für Gebäude der Gebäudeklasse 4. Master Thesis. Technische Universität München.
- Pfluger, R. (2005a): Integration von Lüftungsanlagen im Bestand. Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme Teil 1. In: *KI Luft- und Kältetechnik*.
- Pfluger, R. (2005b): Integration von Lüftungsanlagen im Bestand. Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme Teil 2. In: *KI Luft- und Kältetechnik*.
- Pfluger, R. (2006): Lösungen für die Kanalführung in der Bestandssanierung. In: *KI Luft- und Kältetechnik*.
- Piening, W. (1937): Schalldämpfung der Ansaug- und Auspuffgeräusche von Dieselanlagen auf Schiffen. VDI-Zeitschrift 81 (1937), Nr. 26, S. 770-776.
- Pietruschka, D.; Varga, E.; Drechsler, A.; Marin, R.; Eicker, U.; Fischer, H.-M. (2011): Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden - vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus. Hochschule für Technik Stuttgart.
- Pluggit GmbH (2009): Neues Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung – Im Bestand sanieren. In: *SBZ 5/2009* (110-112).
- Polifke, W.; Kopitz, J. (2011): Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden. 2., aktualisierte Aufl., [Nachdr.]. München [u.a.]: Pearson Studium (Ing).
- Recknagel, H.; Sprenger, E. (2011): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik ; mit 4 Einschlagtafeln. 75. Aufl., Jubiläumsausg. München: Oldenbourg Industrieverl.
- REGEL-air (2013): REGEL-air Fensterlüfter. Preititz. Online verfügbar unter <http://www.regel-air.de/downloads/folderregelair12013finalmailmedpr.pdf>, zuletzt geprüft am 03.02.2014.
- Richter, W.; Hartmann, T. (2001): Bedarfslüftung im Wohnungsbau. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Bau- und Wohnforschung, F 2398).
- RWE (2010): RWE Bau-Handbuch. Mit EnEV 2009 ; Praxiswissen für Ihr Bauprojekt. Unter Mitarbeit von Bernd Dietrich. 14. Ausg. Frankfurt am Main [u.a.]: VWEW Energieverl.
- Schlummer, M. (2015): CreaSolv: Das Recyclingverfahren für Polystyrol. Hessischer Energieberatertag 2015. Frankfurt am Main. 19.11.2015
- Schmid, J. (2010): Energiekonzept 2050 - Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien". In: *FVEE*, S. 51–57. Online verfügbar unter http://www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf, zuletzt geprüft am 09.01.2014.

- Seifert, J.; Gritzki, R.; Rösler, M.; Richter, W. (2003): Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl (Bau- und Wohnforschung, F 2425).
- SI (2007): Baugruppen, Geräte und Systeme zum Messen, Steuern, Regeln, Prüfen, Kalibrieren. Hg. v. Special Instruments.
- Stiegel, H.; Krause, M. (2012): Minimalinvasives Sanierungssystem mit vorgefertigtem, multifunktionalem WDVS-Modul. In: *GI Gesundheits-Ingenieur* 133 (Heft 6), S. 290 ff.
- Stolte, C.; Marcinek, H.; Discher, H.; Hinz, E.; Enseling, A. (2011): Dena-Sanierungsstudie Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“.
- Täschner, I. (2012): Effizienzpotentiale im Wärmemarkt. Das Energieforum von BDEW, VDE und ZVEI. Hannover, 24.04.2012.
- TRNbuild (2005): Multizone Building modeling with Type 56 and TRNbuild. University of Wisconsin-Madison.
- TRNflow (2006): TRNflow - A module of an air flow network for coupled simulation with TYPE 56 (multi-zone building of TRNSYS). University of Wisconsin-Madison.
- TRNSYS (2012): TRNSYS 17 a transient System simulation program. University of Wisconsin-Madison.
- TRNSYS3D (2012): TRNSYS3D Tutorial. TRANSSOLAR Energietechnik GmbH.
- Trogisch, A. (2005): Zur Problematik des Lüftens von Wohnungen. In: *TGA-Fachplaner* (H. 3), S. 70–76.
- Trogisch, A. (2011): Planungshilfen Lüftungstechnik. 4., überarb. Aufl. Berlin, Offenbach: VDE-Verl.
- TZWL (2011): TZWL Bulletin 12. Liste für Wohnungslüftungsgeräte mit und ohne Wärmerückgewinnung. 12. Aufl.
- Umweltbundesamt (2017): Hexabromcyclododecan (HBCD) - Antworten auf häufig gestellte Fragen. Dezember 2017. Dessau-Roßlau.
- VDI (2006): VDI-Wärmeatlas. [Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübertragung]. 10., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer.
- VisionAir (2011): Installationsbeispiel Oval-Flachkanalsystem auf Gebäudefassade. VisionAir Lüftungs- und Luftheiztechnik GmbH Deutschland. Online verfügbar unter http://www.visionair.eu/content/visionair_installationsbeispiel_ovalkanal_auf_fassade-1481.pdf, zuletzt geprüft am 09.01.2014.
- Wagner, W. (2012): Strömung und Druckverlust. Mit Beispielsammlung. 7., überarb. und erw. Aufl. Würzburg: Vogel (Kamprath-Reihe).
- Walberg, D.; Holz, A.; Gniechwitz, T.; Schulze, T. (2011): Wohnungsbau in Deutschland - 2011 Modernisierung oder Bestandsersatz. ARGE Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.

WschV: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV) vom 16. August 1977. Bundesgesetzblatt (1977), Teil 1, S. 1554–1585. 24. Februar 1982, Bundesgesetzblatt (1982), Teil 1, S. 209 ff., 16. August 1994, Bundesgesetzblatt (1994), Teil 1, S. 2121– 2132.

Ziegler, M. (2010): Innovative Gebäudesanierung über eine Fassadendämmung mit integrierter Luftführung. Master Thesis. Universität Kassel, Kassel.

Ziegler, M.; Krause, M.; Kaiser, J. (2012): Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Thermische und strömungstechnische Simulation einer Fassadendämmung mit integrierter Luftführung für die Bestandssanierung. Konferenzbeitrag BauSIM 2012, Dresden, URL http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2012/BauSIM2012_152.pdf

Ziegler, M.; Krause, M.; Kaiser, J. (2013): Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Innovative façade refurbishment with integrated air ducting for the existing building stock: Konferenzbeitrag sb13 Implementing Sustainability – Barriers and Chances, Sustainable Building Conference, April 24-26, 2013 Munich.

Ziegler, M.; Krause, M. (2013): Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Innovative façade refurbishment with integrated air ducting for the existing building stock: Konferenzbeitrag CESB13 – Central Europe towards Sustainable Building 2013, June 26-28, 2013 Prague. URL http://www.cesb.cz/cesb13/proceedings/1_refurbishment/CESB13_1237.pdf

Ziegler, M.; Krause, M. (2014): Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Innovative façade refurbishment with integrated air ducting for the existing building stock: Konferenzbeitrag NSB14 10th Nordic Symposium on Building Physics, 15-19 June 2014, Lund.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wärmedämmplatte mit Lüftungskanal	4
Abb. 2: Kanalführung an einem Wohngebäude	4
Abb. 3: Verarbeitung der Wärmedämmplatten an einem Gebäude in Tegernsee	4
Abb. 4: Kernbohrung (links) und Einsetzen des Tellerventils zum Anschluss des Luftkanals an den Raum (rechts).....	4
Abb. 5: Struktur der Dissertation.....	6
Abb. 6: Notwendige Außenluftwechselraten entsprechend der Lüftungsbetriebsstufen gemäß [DIN 1946-6] Tabelle 5 und Infiltrationsluftwechsel für verschieden große Nutzungseinheiten.....	12
Abb. 7: Lüftungssysteme für Wohngebäude nach [DIN 1946-6]	13
Abb. 8: Querlüftungsprinzip	14
Abb. 9: Schachtlüftungsprinzip	14
Abb. 10: Zentrale Abluftanlage nach [RWE 2010].....	15
Abb. 11: Dezentrale Lüftung mit Einzelraum-Lüftungsgerät mit WRG.....	16
Abb. 12: Zentrale Zu- und Abluftanlage mit WRG.....	16
Abb. 13: Wohnungszentrale Zu- und Abluftanlagen mit Ringleitung im Mehrgeschosswohnungsbau	17
Abb. 14: Dezentrale Wohnungslüftung mit WRG nach dem Pendellüfter-Prinzip gemäß [InVENTer 2013].....	18
Abb. 15: Näherungsweise Dimensionierung der Luftleitungen in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms gemäß [DIN 1946-6: 2009-05]	22
Abb. 16: Ventilator- und Anlagenkennlinien im Leistungsschaubild gemäß [Recknagel und Sprenger 2011], eigene Darstellung.....	25
Abb. 17: Dosierung des Luftvolumenstroms einer Lüftungsanlage mittels Druckverlustregelung und Drehzahlregelung	26
Abb. 18: Zentrale Abluftanlage mit Nutzung der Abwärme über eine Wärmepumpe zur Trinkwarm-wasserbereitung	36
Abb. 19: Zentrale Lüftungsanlage mit WRG und Lüftungswärmepumpe zur Luftnachheizung und Trinkwarmwassererwärmung.....	36
Abb. 20: Zuluftleitungen auf Süd- und Westfassade mit horizontalem Verteilkanal.....	39
Abb. 21: Abluftleitungen auf Nord- und Ostfassade mit horizontalem Sammelkanal.....	39
Abb. 22: Lüftungskonzept des Testgebäudes mit Zu- und Abluftbereichen beider Geschosse .	40
Abb. 23: Schema des Lüftungssystems und Lage der Messsensoren am Demonstrationsgebäude	41
Abb. 24: Vergleich der gemessenen Volumenströme beider Geschosse bei freier Luftverteilung, mit angepassten Tellerventilen und den Auslegungswerten nach reduzierter Lüftung ...	43
Abb. 25: Gemessener Druckverlust im Zuluft- und Abluftkanal und gemessene Leistungsaufnahme des Zuluft- und Abluftventilators während der Heizperiode 2010/2011	44
Abb. 26: Gemessene Lufttemperaturen am Zentralgerät und Leistungsaufnahme der beiden Ventilatoren, vgl. [Ziegler 2010]	46
Abb. 27: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für die Heizperiode 2010/2011	48
Abb. 28: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für drei untersuchte Heizperioden.....	48

Abb. 29: Querschnitt der Außenwand mit Wärmestromdichte- und Temperaturmessung im Regelquerschnitt (links) und auf Höhe eines vertikalen Luftkanals (rechts)	49
Abb. 30: Wärmestromdichte an der homogenen Wärmedämmschicht am Wandprofil und auf Höhe des Zuluftkanals in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz.....	50
Abb. 31: Wärmebrückenverlustkoeffizient in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms für verschiedene Lüftungsstufen.....	51
Abb. 32: Gemessene relative Luftfeuchte im Fußpunkt des Bad-Abluftkanals und im Zuluftkanal vor Eintritt der Luft in das obere Wohnzimmer sowie gemessene Außenlufttemperatur für zwei ausgewählte Zeiträume während der Heizperiode	52
Abb. 33: Außenluftansaugung mit Lüftungs-gitter	53
Abb. 34: 90°-Umlenkung im zentralen Abluftkanal mit Staubablagerungen	53
Abb. 35: Verbindungsstück zwischen Wohnzimmer im OG und Fassadenkanal.....	54
Abb. 36: Verbindungsstück zwischen Bad im OG und Fassadenkanal	54
Abb. 37: Vertikaler Lüftungskanal im oberen Wohnzimmer	54
Abb. 38: Vertikaler Lüftungskanal in der oberen Küche	54
Abb. 39: Laminarstromelement (Grafik: LFE-Typ PT Größe 5 [SI 2007]) links und prinzipieller Aufbau der Kapillarröhrchenstruktur im Inneren des LFE (Grafik: [Ilg 2013]) rechts.....	58
Abb. 40: Messaufbau mit Ventilator, Beruhigungsstrecke und LFE	60
Abb. 41: Anschlussstück mit Druckaufnahme in den Kanälen	60
Abb. 42: 90°-Umlenkung	61
Abb. 43: Wandanschlussstück.....	61
Abb. 44: Berechnete spezifische Druckverluste für rechteckige Flachkanäle gleicher Geometrie (30 mm x 300 mm) bei Variation der Rauigkeit ϵ	62
Abb. 45: Gemessener spezifischer Druckverlust der geraden Kanalplatten bei unterschiedlichen Abdichtungsvarianten	63
Abb. 46: Gemessener spezifischer Druckverlust der abgedichteten Luftkanäle mit einem Dichtband und berechnete Druckverluste für einen Blechkanal mit $\epsilon=0,15$, siehe auch [Ziegler und Krause 2013]	64
Abb. 47: Gemessener Druckverlust der 90°-Umlenkung und berechnete Anteile, die sich aufgrund der Durchströmung der geraden Kanalstrecke und der Umlenkung ergeben..	64
Abb. 48: Gemessener Druckverlust des Kniestücks und berechneter Druckverlust für unterschiedliche Widerstandsbeiwerte ζ_u	65
Abb. 49: Einbaumöglichkeiten des Verbindungsrohrs an den Lüftungskanal am Wandanschlussstück mit bündigem Anschluss (links) und mit angeschnittenem Kunststoffrohr	66
Abb. 50: Gemessener Druckverlust des Wandanschlusses bei unterschiedlicher Durchströmung und Ausführung mit bündigem Anschluss und mit angeschnittenem Rohr	67
Abb. 51: Gemessener Druckverlust der Wandanschlussstücke bei Über- und Unterdruck für die beiden Rohrkonfigurationen und berechnete Anteile, die sich aufgrund der Wandreibung der Kanalstrecke und des Anschlusses ergeben	67
Abb. 52: Gemessene Druckverluste des Wandanschlusses bei unterschiedlicher Durchströmung und Rohrkonfiguration und berechnete Druckverlustkurven	68
Abb. 53: Schematische Darstellung des Aufbaus für die Referenz-Volumenstrommessung mit unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken.....	69
Abb. 54: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse der beiden LFE bei unterschiedlichen Einlaufstrecken und Durchströmungsrichtungen	70
Abb. 55: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse für unterschiedliche Einlaufstrecken und Anordnung der LFE bei Überdruck	70
Abb. 56: Vergleich der gemessenen Volumenströme aller Referenzmessungen beider LFE (58 mm und 78 mm)	71

Abb. 57: Mittleres gemessenes Volumenstromverhältnis aller Referenzmessungen mit Fehlerbalken der Standardabweichung	72
Abb. 58: Schematische Darstellung des Aufbaus der Volumenstrommessung mit unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken.....	72
Abb. 59: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse der beiden LFE bei unterschiedlicher Abdichtung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und bei Variation der Durchströmungsrichtung	73
Abb. 60: Gemessenes Volumenstromverhältnis der beiden LFE für eine Messstrecke der Dämmstoffkanäle von 6 m bei abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalfuge für Durchströmung mit Über- und Unterdruck mit Angabe der Messunsicherheit.....	74
Abb. 61: Messanordnung für die Bestimmung des Luftvolumenstroms an beiden LFE mit längeren Einlaufstrecken und optimierter Kanalgeometrie	74
Abb. 62: Vergleich der relativen Abweichung der gemessenen Volumenströme an beiden LFE bei unterschiedlich langen Einlaufstrecken.....	75
Abb. 63: Messanordnung für die Bestimmung der Leckagerate einer Dämmkanalplatte mit längeren Einlaufstrecken und optimierter Kanalgeometrie	75
Abb. 64: Vergleich der gemessenen Volumenstromverhältnisse an beiden LFE vor und nach einer Dämmkanalplatte bei unterschiedlich langen Ein- und Auslaufstrecken	76
Abb. 65: Südwestansicht (links) und Nordostansicht (rechts) des zonierten Demonstrationsgebäudes in TRNSYS3D	79
Abb. 66: Mittlere Lufttemperatur und Monatssummen der Global-, Diffus- und Direktstrahlung für die Klimadatensätze des TRY-Region 7 2011	83
Abb. 67: Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ des Lüftungskanals in der Außenwand in Abhängigkeit des Temperaturfaktors f der Kanalluft, siehe auch [Hauser und Kaiser 2013].....	87
Abb. 68: Außenwandaufbau mit integriertem Lüftungskanal und Rohrmodell Type 31 in TRNSYS.....	89
Abb. 69: Gemessene Ablufttemperaturen der Räume am Demonstrationsgebäude im November 2010	92
Abb. 70: Gemessene Lufttemperaturen am Zentralgerät des Demonstrationsgebäudes im November 2010	93
Abb. 71: Vergleich des gemessenen und simulierten Verlaufs der Zulufttemperatur im Wohnzimmer des OG und der Ablufttemperatur am Lüftungsgerät während des Messzeitraums im November 2010	94
Abb. 72: Luftströmungsmodell des Demonstrationsgebäudes als idealisiertes Netzwerk aus Luftknoten und Strömungsdurchlässen in TRNflow, siehe auch: [Ziegler et al. 2012]	96
Abb. 73: Vergleich des berechneten spezifischen Heizwärmebedarfs des Gebäudes im unsanierten Zustand, nach der baulichen Sanierung (Außenwand und Dach) und nach der Sanierung der Außenwand- und Dachflächen sowie der Installation einer RLT-Anlage mit fassadenintegrierter Luftkanalführung	97
Abb. 74: Berechnete Wärmeverluste in der dämmstoffintegrierten Luftkanalführung und aufgeteilt nach Zuluft- und Abluftkanalnetz während der Betriebszeit der Lüftungsanlage	98
Abb. 75: Vergleich der gemessenen und berechneten Luftvolumenströme beider Geschosse bei freier Verteilung und den Auslegungswerten für Nennlüftung nach [DIN 1946-6].....	99
Abb. 76: Vergleich der gemessenen und berechneten Luftvolumenströme beider Geschosse bei einjustierten Ventilen und den Auslegungswerten für Nennlüftung nach [DIN 1946-6].	100
Abb. 77: Vergleich der Systemdruckverluste im Zuluft- und Abluftkanalnetz in der Luftströmungs-simulation und bei der statischen Berechnung	101
Abb. 78: Einfluss der Türstellung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen.....	102

Abb. 79: Einfluss der Infiltrationsvolumenströme bei unterschiedlicher Dichtigkeitsausführung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen.....	103
Abb. 80: Vergleich der Infiltrations- und Exfiltrationsvolumenströme bei unterschiedlicher Dichtigkeitsausführung in den einzelnen Räumen in beiden Geschossen	104
Abb. 81: Einfluss der Fensterstellung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen im Erdgeschoss während der ersten Januarwoche	105
Abb. 82: Vergleich des berechneten spezifischen Heizwärmebedarfs des Gebäudes im unsanierten Zustand, nach der baulichen Sanierung (Außenwand, Fenster und Dach) und nach der zusätzlichen Installation einer RLT-Anlage mit fassadenintegrierter Luftkanalführung.....	106
Abb. 83: Vergleich der Heizwärmebedarfe des sanierten Gebäudes ohne Austausch der Fenster bei Variation der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle	107
Abb. 84: Jährliche am Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts zurückgewonnene Wärmeenergie und Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes des sanierten Gebäudes ohne Fensteraustausch mit fassadenintegrierter Luftkanalführung bei variierter Dämmstoffüberdeckung	108
Abb. 85: Vorder- und Rückansicht zweier GK2-Reihenhäuser mit vertikaler Kanalverlegung, Zuluftkanal in Grün und Abluftkanal in Rot.....	116
Abb. 86: Vorderansicht des GK3-Gebäudes mit den an die Außenwände angrenzenden Innenwänden in Rot (links) und der dazugehörige Grundrissplan (rechts)	117
Abb. 87: Zusätzliche Brandschutzmaßnahmen für das GK4-Gebäude mit Brandriegel (oben) und Sturzschutz über jeder Fensteröffnung (unten), siehe auch [Ziegler und Krause 2014].....	118
Abb. 88: Lösung für die Kanalführung auf der Fassade bei begrenztem Platzangebot zwischen den Fenstern am Beispiel des GK3-Gebäudes: Anschluss zweier Räume mit einem Luftkanal (links) und Aufteilung der Luftkanäle mit Anschluss über den Keller und den Dachboden (rechts).....	119
Abb. 89: Lösung für die Kanalführung bei rückgesetzten Balkonen mit auskragender Balkonplatte durch Nutzung der seitlichen Balkonwände für die Kanalverlegung, links: ein Kanal für zwei Räume, rechts: Trennung der Geschosse	120
Abb. 90: Nachträgliche Nutzung stillgelegter Schächte für die Abluftkanalführung in Küchen und Bädern.....	121
Abb. 91: Lösung für die Luftkanalführung für GK4-Gebäude bei Anordnung eines umlaufenden Brandriegels mit fassadenintegrierter Zu- und Abluftkanalführung und Nutzung eines Luftkanals für zwei übereinanderliegende Räume, Anschluss zweier Geschosse über den Dachboden und den Keller	122
Abb. 92: Lösung für die Luftkanalführung für GK4-Gebäude bei Anordnung eines umlaufenden Brandriegels mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung und Abluftkanalführung über bestehende Schachtsysteme, Anschluss zweier Geschosse über den Dachboden und den Keller	122
Abb. 93: Brandriegeldurchführung mit Lüftungskanal aus nichtbrennbarem Material und zusätzlich eingeschobenes Gitter mit intumeszierender Beschichtung	123
Abb. 94: Referenzsysteme mit innenliegender Luftkanalführung für das Zweifamilienhaus in Kassel mit horizontaler Verteilung (links) und vertikaler Verteilung (rechts).....	126
Abb. 95: Vergleich der Heizwärmebedarfe des sanierten Gebäudes ohne Austausch der Fenster bei fassadenintegrierter Luftkanalführung und innenliegender Kanalführung mit horizontaler bzw. vertikaler Verteilung	128
Abb. 96: Vergleich der jährlich am Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts zurückgewonnenen Wärmeenergie und der Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes des sanierten	

Gebäudes ohne Fensteraustausch mit fassadenintegrierter Luftkanalführung und innenliegender horizontaler und vertikaler Kanalführung	129
Abb. 97: Westansicht der Gebäude mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung für das zentrale Lüftungssystem	133
Abb. 98: Ostansicht der Gebäude mit fassadenintegrierter Zuluftkanalführung für das zentrale Lüftungssystem	133
Abb. 99: Schema der Luftleitungsführung eines Geschosses mit nachträglich installierten wohnungszentralen Lüftungsanlagen	134
Abb. 100: Vergleich der berechneten spezifischen Heizwärmebedarfe der beiden Mehrfamilienhäuser im Ausgangszustand, nach der baulichen Sanierung sowie nach Installation eines zentralen Lüftungssystems mit je zwei und vier Anlagen und bei Einsatz von Wohnungslüftungsanlagen	139
Abb. 101: Berechnete jährliche Wärmeverluste während der Nutzungszeit beider zentraler Lüftungssysteme, Anteile getrennt für die fassadenintegrierte Luftkanalführung und die Leitungsführung im Dachboden bzw. im Keller	140
Abb. 102: Vergleich der jährlich am Wärmeübertrager der Lüftungsgeräte zurückgewonnenen Wärmeenergie und der Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes der sanierten Gebäude bei Einsatz der zentralen Lüftungssysteme und bei Nutzung wohnungszentraler Lüftungsanlagen	140
Abb. 103: Vergleich der Heizwärmeeinsparung, des zusätzlichen Hilfsstrombedarfs und der Primärenergieeinsparung bei Einsatz der beiden zentralen Lüftungssysteme mit zwei und vier Lüftungsgeräten und bei Einsatz der Wohnungslüftungsanlagen	142
Abb. 104: Vergleich der Investitionskosten für die Lüftungstechnik der untersuchten Lüftungssysteme anteilig für die Lüftungsgeräte und die Luftkanalführung	143
Abb. 105: Gesamtannuitäten für die bauliche Sanierung der beiden Gebäude und bei zusätzlichem Einsatz der drei Lüftungssysteme	144
Abb. 106: Schema der Kanaldämmplatte mit integriertem Lüftungskanal	148
Abb. 107: Erweiterung der fassadenintegrierten Luftkanalführung um eine horizontale Kanalplatte und zusätzliche Umlenkungsplatten für mehr Flexibilität bei der Anordnung der Luftkanäle.....	149

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Messparameter und Untersuchungszweck der Langzeitmessungen am Demonstrationsgebäude in Kassel	40
Tab. 2: Bauteilaufbauten des Demonstrationsgebäudes im Ausgangszustand (BAK 1919-1948)	82
Tab. 3: Bauteilaufbauten des Demonstrationsgebäudes im sanierten Zustand gemäß [EnEV 2009]	82
Tab. 4: Normativ ermittelter Luftwechsel für die dynamischen Simulationen gemäß [DIN V 18599-2]	85
Tab. 5: Interne Wärmelasten für Ein- und Mehrfamilienhäuser nach DIN V 18599-2	85
Tab. 6: Systemwirkungsgrad des fassadenintegrierten Lüftungssystems bei Variation der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle mit und ohne zusätzlichen Fensteraustausch	109
Tab. 7: Häufigkeit, mittlerer spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeinsparpotential für Baualtersklassen des Gebäudetyps MFH für die Sanierung der Gebäudehülle nach [Born et al. 2011]	113
Tab. 8: Wohngebäudeklassen nach deutscher Musterbauordnung (MBO) mit typischen Gebäuden	115
Tab. 9: Vergleich der Systemdruckverluste, der Ventilatoranschlussleistungen und des jährlichen Hilfsstrombedarfs des Lüftungssystems am Zweifamilienhaus in Kassel bei fassadenintegrierter Luftkanalführung und zwei innenliegenden Luftkanalsystemen ...	127
Tab. 10: Übersicht der untersuchten Lüftungssysteme an den Mehrfamilienhäusern	132
Tab. 11: Berechnete Druckverluste der einzelnen Stränge beider zentraler Lüftungssysteme und gesamter geförderter Luftvolumenstrom pro Lüftungsabschnitt	136
Tab. 12: Berechnete Druckverluste der Wohnungslüftungsanlagen und gesamter geförderter Luftvolumenstrom pro Lüftungsabschnitt	137
Tab. 13: Anschlussleistung und Wirkungsgrade der Ventilatoren der untersuchten Lüftungssysteme	138
Tab. 14: Übersicht der angesetzten jährlichen Energiepreissteigerungen für die Varianten....	144
Tab. 15: Druckverlustäquivalente Flachkanäle und verbleibende Dämmstoffüberdeckung für integrierte Kanäle bei einer Dämmstoffstärke von 160 mm bei einem Volumenstrom von 50m ³ /h und einem längenspezifischen Druckverlust von 1 Pa/m	148

Anhang A

Tab. A 1: Luftdichtheitsklassen von kreisförmigen Luftleitungen nach [DIN 12237]

Luftdichtheits- klasse	Grenzwert des statischen Drucks (p_s) Pa		Grenzwert der Leckluft rate (f_{max}) $m^3s^{-1}m^{-2}$
	Positiv	Negativ	
A	500	500	$0,027 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$
B	1000	750	$0,009 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$
C	2000	750	$0,003 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$
D^a	2000	750	$0,001 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$

^a Luftleitungssystem für besondere Anwendungen

Tab. A 2: Luftdichtheitsklassen von rechteckigen Luftleitungen nach [DIN 1507]

Luftdicht- heits- klasse	Grenzwert der Leckluft rate (f_{max}) $m^3s^{-1}m^{-2}$	Grenzwert des statischen Drucks (p_s) Pa			
		Negativ für alle Druckklassen	Positiv bei Druckklasse		
			1	2	3
A	$0,027 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$	200	400		
B	$0,009 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$	500	400	1000	2000
C	$0,003 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$	750	400	1000	2000
D^a	$0,001 \times p_t^{0,65} \times 10^{-3}$	750	400	1000	2000

^a Luftleitungssystem für besondere Anwendungen

Tab. A 3: Kennwerte für den zulässigen Schalldruckpegel L_{AF} in Lüftungstechnischen Anlagen in Aufenthaltsräumen für verschiedene Schallschutzstufen gemäß [VDI 4100] und [Heinz 2011]

Nutzungsart	Geräusch- entstehungsbereich	SSt I	SSt II	SSt III
NE im MFH	fremd	Anforderungen nach DIN 4109	30	25
EFH als RH oder DHH			25	20
EFH oder NE im MFH (keine „offene“ Grundrissgestaltung)	eigen	Normaler Schallschutz nach DIN 4109 Bbl. 2	30	25

Tab. A 4: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala nach [DIN EN 7730]

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß



Abb. A 1: Nordwestansicht des Demonstrationsgebäudes vor der energetischen Sanierung



Abb. A 2: Nordwestansicht des Demonstrationsgebäudes nach der energetischen Sanierung

Tab. A 5: Volumenstromdimensionierung im Demonstrationsgebäude gemäß [DIN 1946-6] „Nennlüftung“

Etage	Raum	Grundfläche [m²]	Volumen [m³]	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]
EG	Zimmer 1	19,4	54,3	-	40
	Zimmer 2	11,1	31,1	-	20
	Zimmer 3	8,7	24,5	-	20
	Küche	16,1	45,1	50	-
	Bad	6,4	17,9	20	-
	WC	2	5,6	10	-
OG	Zimmer 1	19,4	54,3	-	40
	Zimmer 2	11,1	31,1	-	20
	Zimmer 3	8,7	24,5	-	20
	Küche	16,1	45,1	50	-
	Bad	6,4	17,9	30	-

Tab. A 6: Liste der Messsensoren am Demonstrationsgebäude

Bezeichnung	Messsensor	Einheit	Messstelle
RLT_Ab_TL	Lufttemperatur	°C	Lüftungsgerät Abluftseite
RLT_Au_TL	Lufttemperatur	°C	Lüftungsgerät Außenluftseite
RLT_Fo_TL	Lufttemperatur	°C	Lüftungsgerät Fortluftseite
RLT_Zu_TL	Lufttemperatur	°C	Lüftungsgerät Zuluftseite
EG_ZuL_AZ_TL	Lufttemperatur	°C	EG Arbeitszimmer
EG_ZuL_SZ_TL	Lufttemperatur	°C	EG Schlafzimmer
EG_ZuL_WZ_TL	Lufttemperatur	°C	EG Wohnzimmer
EG_AbL_Ku_TL	Lufttemperatur	°C	EG Küche
EG_AbL_Bd_TL	Lufttemperatur	°C	EG Bad
EG_AbL_WC_TL	Lufttemperatur	°C	EG Toilette
OG_ZuL_AZ_TL	Lufttemperatur	°C	OG Arbeitszimmer
OG_ZuL_SZ_TL	Lufttemperatur	°C	OG Schlafzimmer
OG_ZuL_WZ_TL	Lufttemperatur	°C	OG Wohnzimmer
OG_AbL_Ku_TL	Lufttemperatur	°C	OG Küche
OG_AbL_Bd_TL	Lufttemperatur	°C	OG Bad
OG_ZuL_WZ_rF	Relative Luftfeuchtigkeit	%	OG Wohnzimmer
AblKa_Bd_rF	Relative Luftfeuchtigkeit	%	Abluftsammelkanal / Badstrang
RLT_Ab_rF	Relative Luftfeuchtigkeit	%	Lüftungsgerät Abluftseite
dP_Zu	Druckdifferenz	Pa	Zuluft am Lüftungsgerät
dP_Ab	Druckdifferenz	Pa	Abluft am Lüftungsgerät
eIP_Zu	Leistungsaufnahme	W	Zuluftventilator
eIP_Ab	Leistungsaufnahme	W	Abluftventilator
PrWa_AZ_TObA	Oberflächentemperatur	°C	Wandprofil EG Arbeitszimmer Dämmung außen
PrWa_AZ_TObI	Oberflächentemperatur	°C	Wandprofil EG Arbeitszimmer Dämmung innen
PrWa_AZ_WS	Wärmestromdichte	W/m ²	Wandprofil EG Arbeitszimmer
PrKa_AZ_TL	Lufttemperatur	°C	Kanalprofil EG Arbeitszimmer
PrKa_AZ_TObA	Oberflächentemperatur	°C	Kanalprofil EG Arbeitszimmer Dämmung außen

PrKa_AZ_TObI	Oberflächentemperatur	°C	Kanalprofil EG Arbeitszimmer Dämmung innen
PrKa_AZ_TObK	Oberflächentemperatur	°C	Kanalprofil EG Arbeitszimmer Kanaloberfläche
PrKa_AZ_WS	Wärmestromdichte	W/m ²	Kanalprofil EG Arbeitszimmer

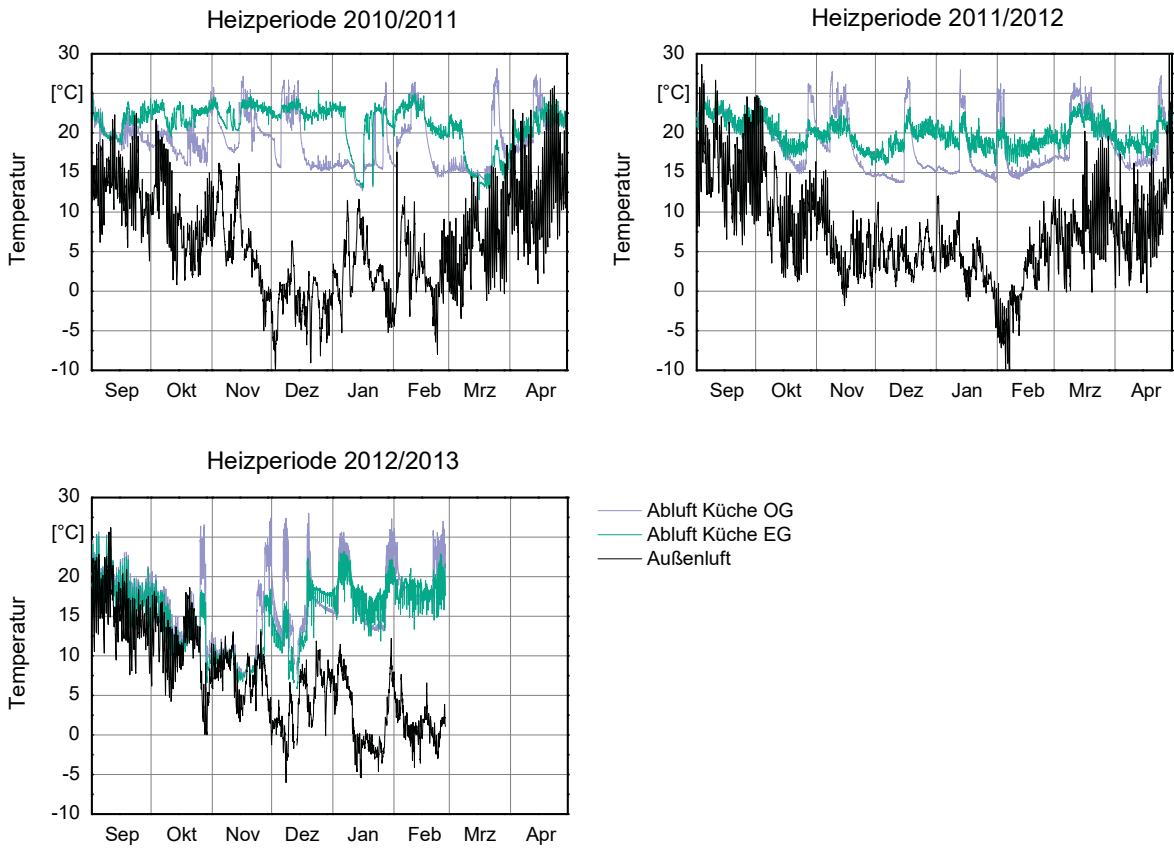


Abb. A 3: Temperaturverlauf der Außenluft und Küchenabluft (EG/OG) für die drei Heizperioden

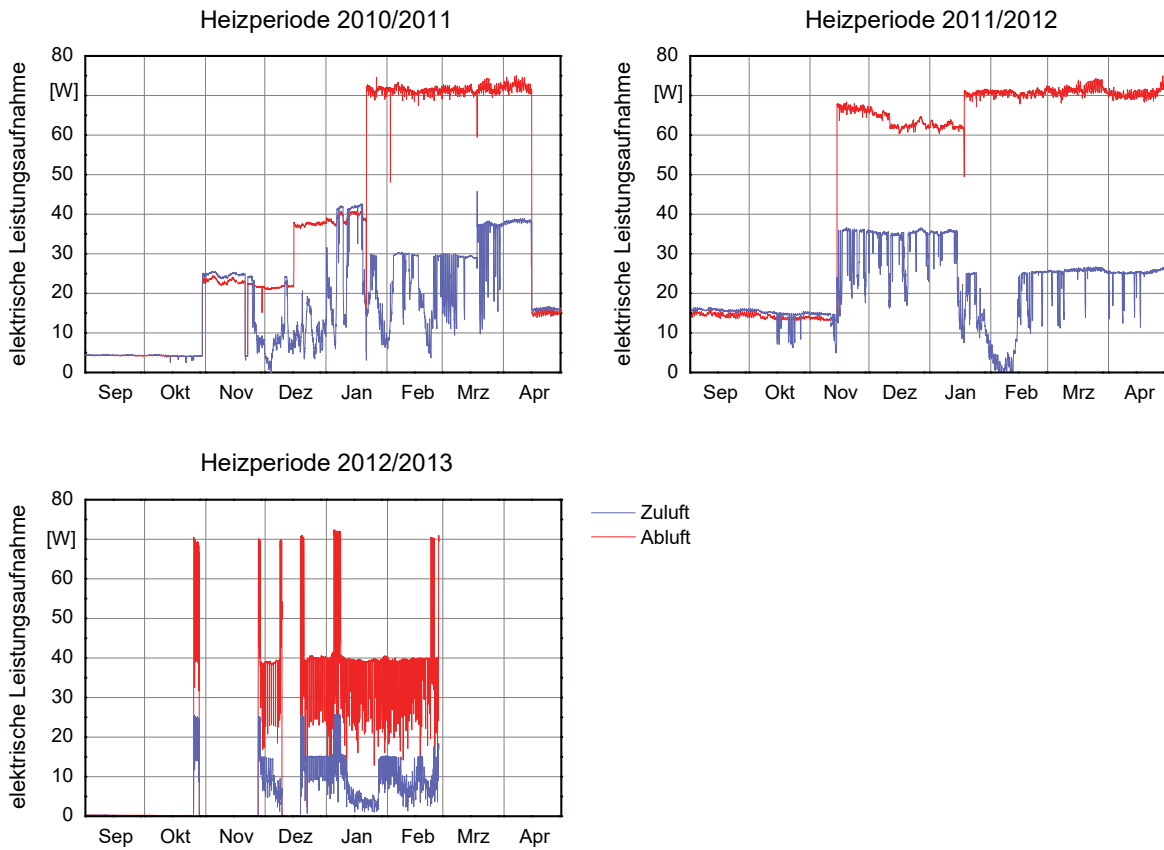


Abb. A 4: Leistungsaufnahme beider Ventilatoren für die drei untersuchten Heizperioden

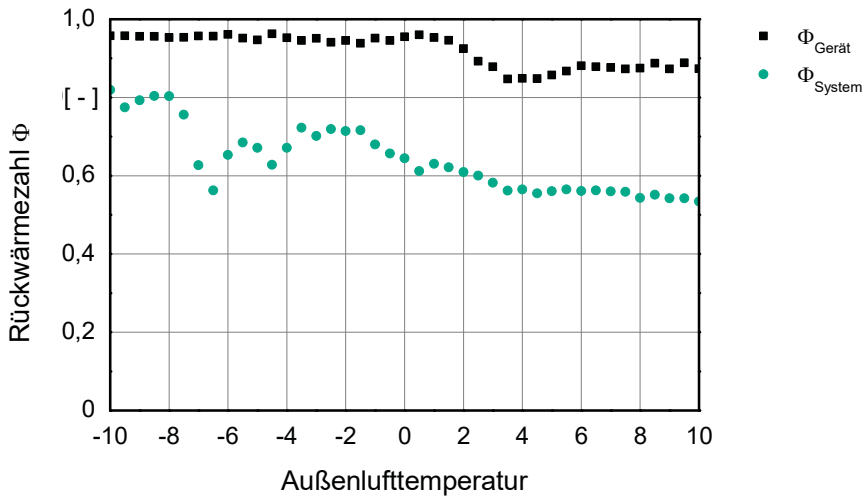


Abb. A 5: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für die Heizperiode 2011/2012

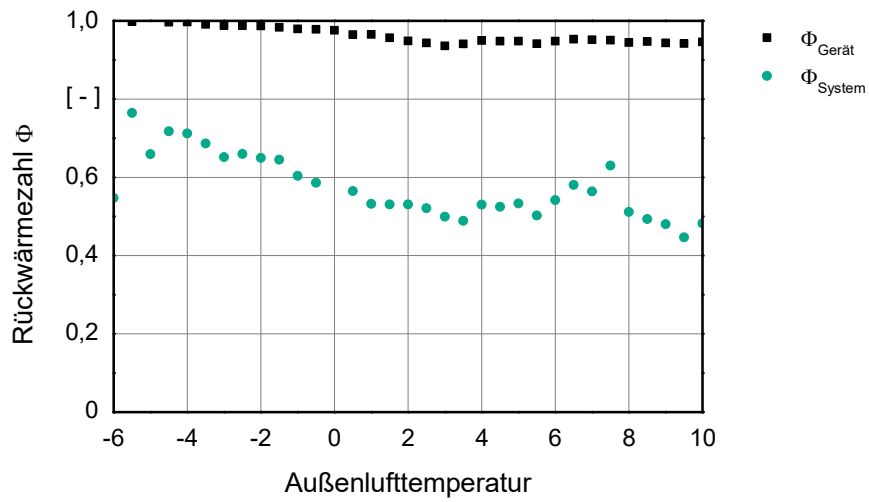


Abb. A 6: Gemessene Rückwärmezahlen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für das Lüftungsgerät und das gesamte Lüftungssystem inklusive fassadenintegrierter Luftkanalführung für die Heizperiode 2012/2013

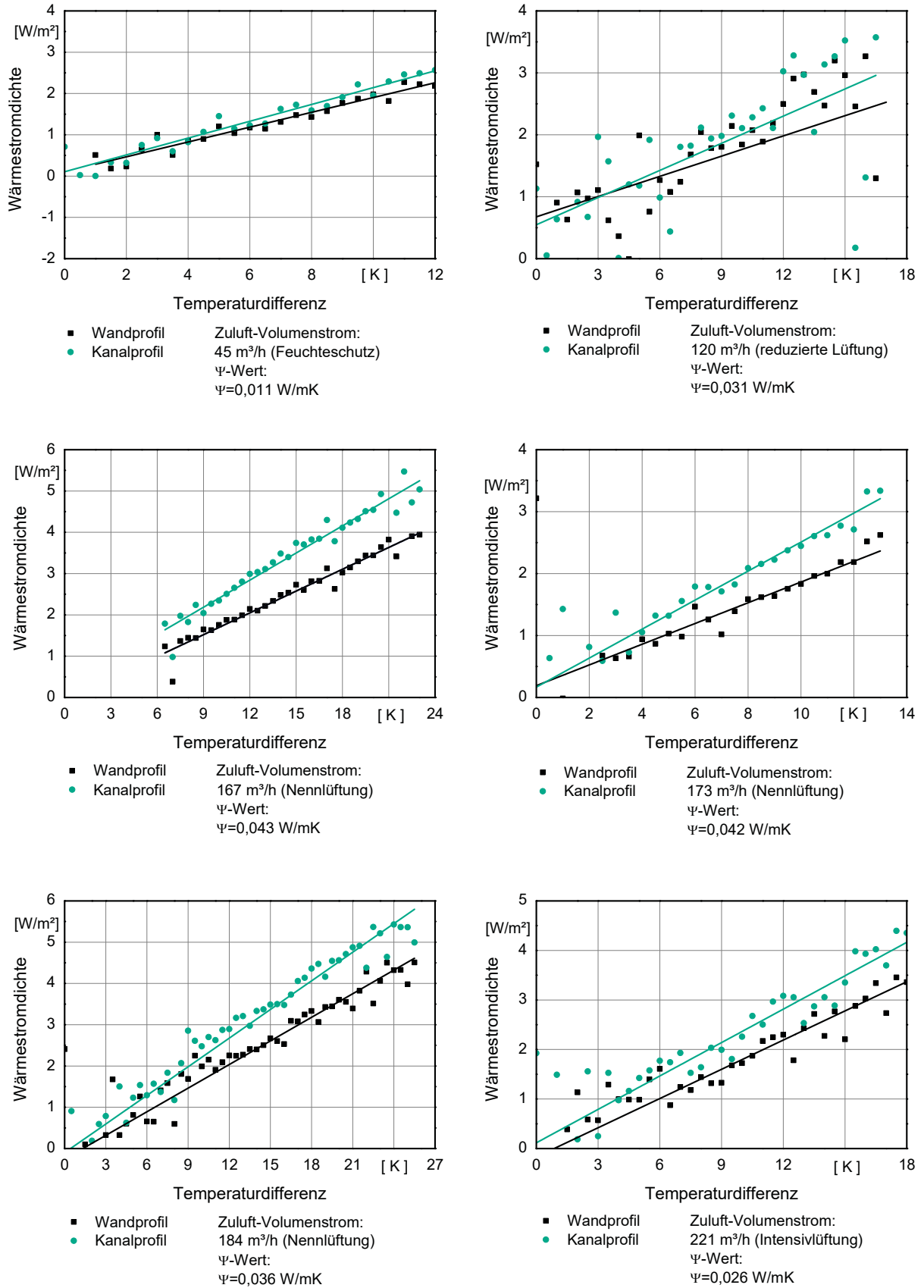


Abb. A 7: Gemessene Wärmestromdichte an der homogenen Wärmedämmschicht am Wandprofil und auf Höhe des Zuluftkanals in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz für verschiedene Zuluftvolumenströme und die daraus resultierenden Ψ -Werte

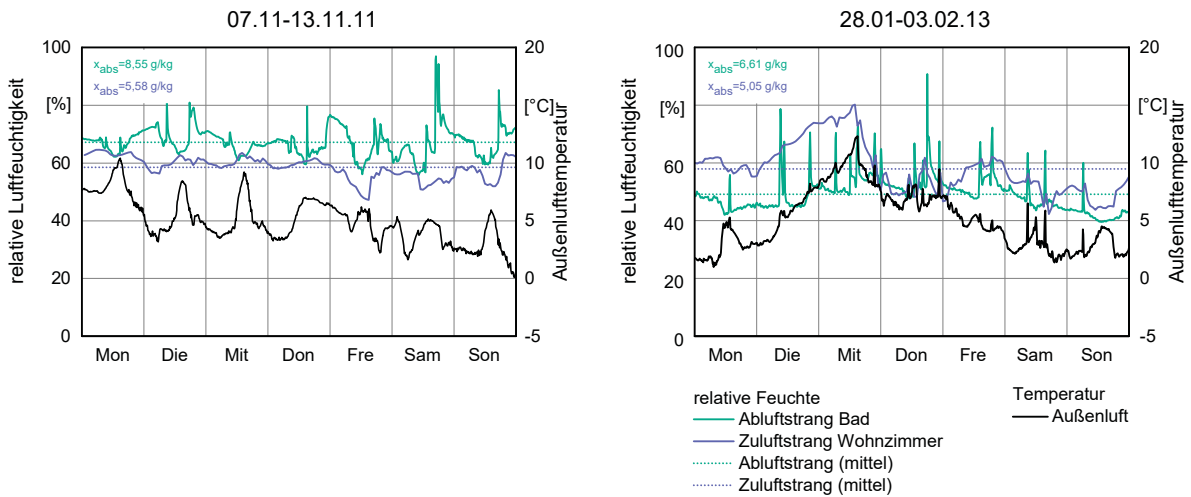


Abb. A 8: Gemessene relative Luftfeuchte im Fußpunkt des Bad-Abluftkanals und im Zuluftkanal vor Eintritt der Luft in das obere Wohnzimmer sowie gemessene Außenlufttemperatur für zwei ausgewählte Zeiträume während der Heizperiode



Abb. A 9: Teller Ventil im Schlafzimmer OG



Abb. A 10: Teller Ventil im Bad OG



Abb. A 11: Abgeklebte 6 m lange Messkanalstrecke

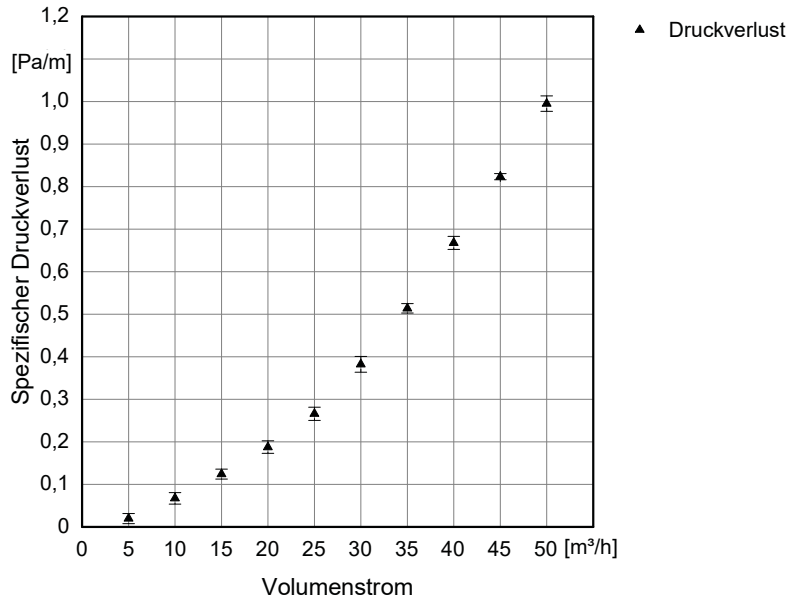


Abb. A 12: Gemessener spezifischer Druckverlust der geraden Kanalplatten mit abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalluge mit Standardabweichung der Messpunkte

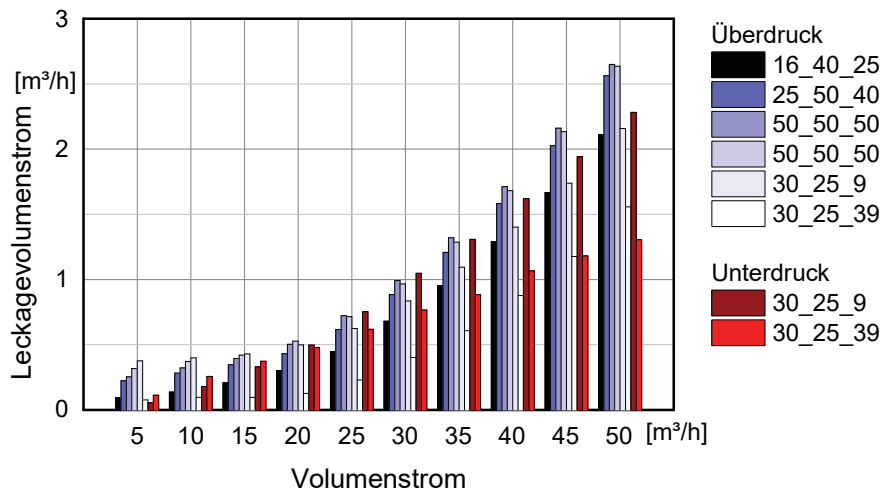


Abb. A 13: Verlauf der gemessenen absoluten Leckagevolumenströme an den LFE bei unterschiedlichen Einlaufstrecken und Durchströmungsrichtungen

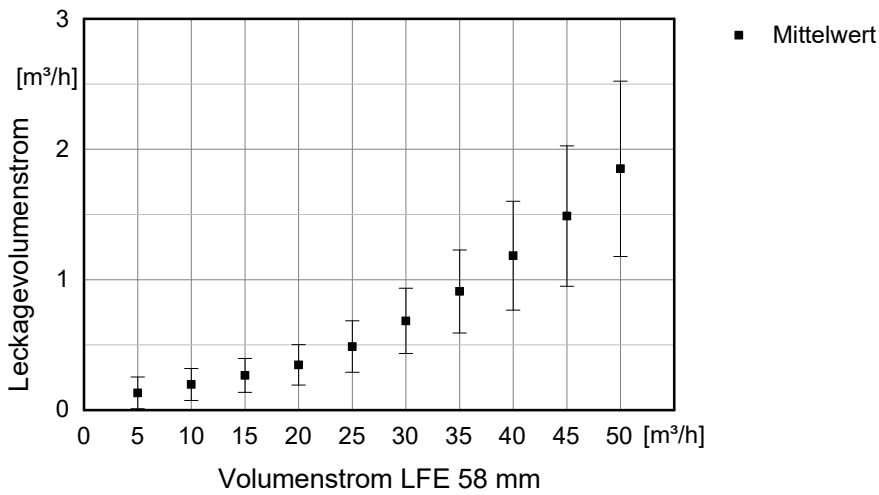


Abb. A 14: Mittlerer Leckagevolumenstrom aller Referenzmessungen mit Fehlerbalken der Standardabweichung

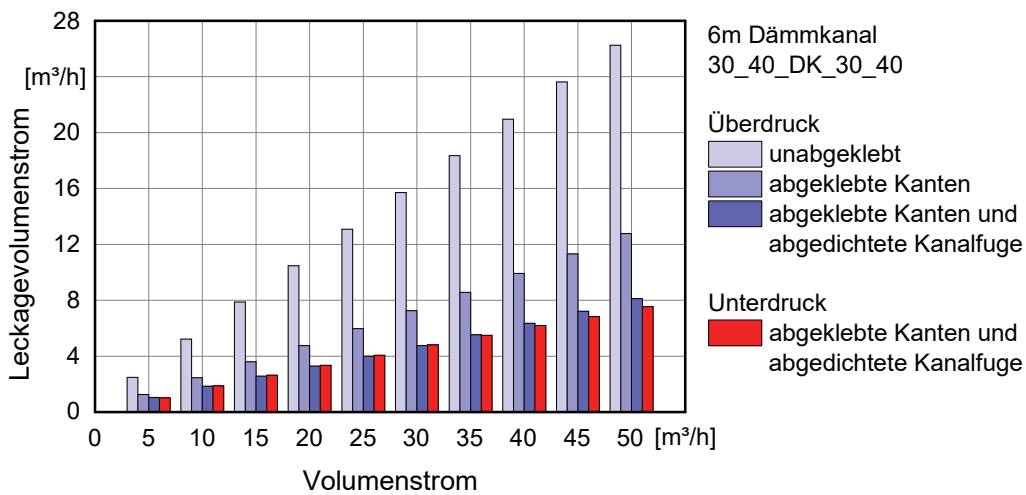


Abb. A 15: Vergleich der gemessenen Leckagevolumenströme an beiden LFE bei unterschiedlicher Abdichtung der dämmstoffintegrierten Lüftungskanäle und bei Variation der Durchströmungsrichtung

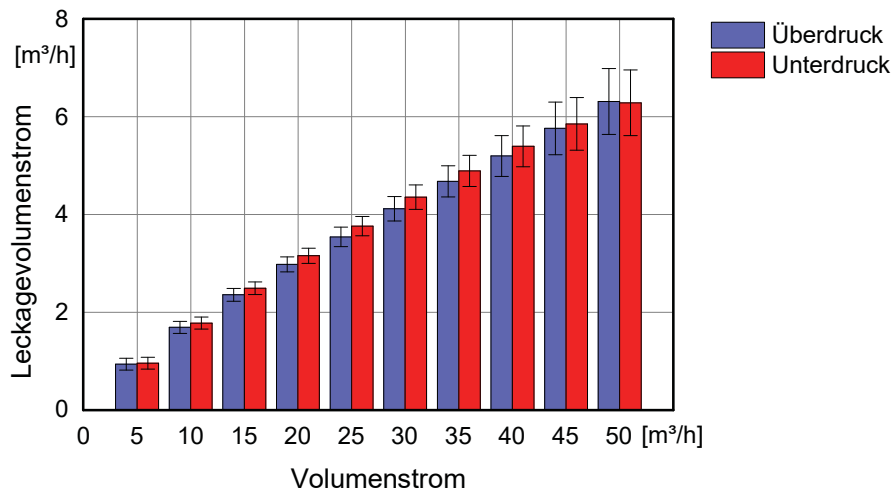


Abb. A 16: Gemessener Leckagevolumenstrom der beiden LFE für eine Messstrecke der Dämmstoffkanäle von 6m bei abgeklebten Kanten und abgedichteter Kanalfuge für Durchströmung mit Über- und Unterdruck mit Angabe der Messunsicherheit

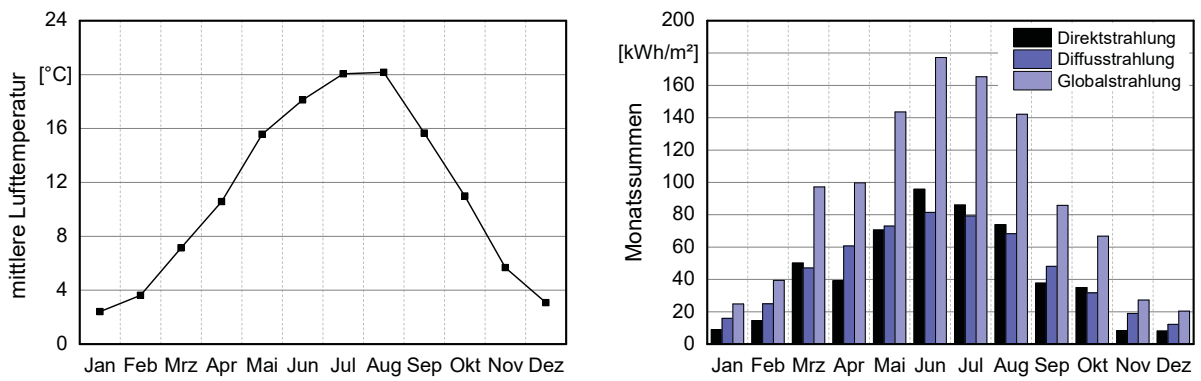


Abb. A 17: Mittlere Lufttemperatur und Monatssummen der Global- Diffus- und Direktstrahlung für die Klimadatensätze der TRY-Region 12 2011

Tab. A 7: Zonierung des untersuchten Demonstrationsgebäudes (Zweifamilienhaus)

Zone	Grundfläche [m²]	Raumhöhe [m]	Raumvolumen [m³]
Dach	93,85	2,69	126,27
Keller	83,50	2,45	204,59
Treppenhaus	10,35	6,90	71,42
EG Zimmer 1	23,54	2,95	69,44
EG Zimmer 2	14,13	2,95	41,69
EG Zimmer 3	11,87	2,95	35,01
EG Küche	19,77	2,95	58,32
EG Bad	7,78	2,95	22,95
EG WC	1,85	2,95	5,45
EG Flur	4,57	2,95	13,47
OG Zimmer 1	23,54	2,95	69,44
OG Zimmer 2	14,13	2,95	41,69
OG Zimmer 3	11,87	2,95	35,01
OG Küche	19,77	2,95	58,32
OG Bad	7,78	2,95	22,95
OG Abstellraum	1,85	2,95	5,45
OG Flur	4,57	2,95	13,47

Tab. A 8: Berechnete Wärmeströme Φ und Wärmebrückenverlustkoeffizienten ψ in Abhängigkeit des Temperaturfaktors f am Außenwandquerschnitt mit integriertem Lüftungskanal

Temperaturfaktor f [-]	Wärmestrom Φ [W]	Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ [W/mK]
0	39,753	0,216
0,1	36,805	0,187
0,2	33,858	0,157
0,3	30,911	0,128
0,4	27,965	0,098
0,5	25,019	0,069
0,6	22,070	0,039
0,7	19,124	0,010
0,8	16,176	-0,02
0,9	13,230	-0,049
1	10,283	-0,078

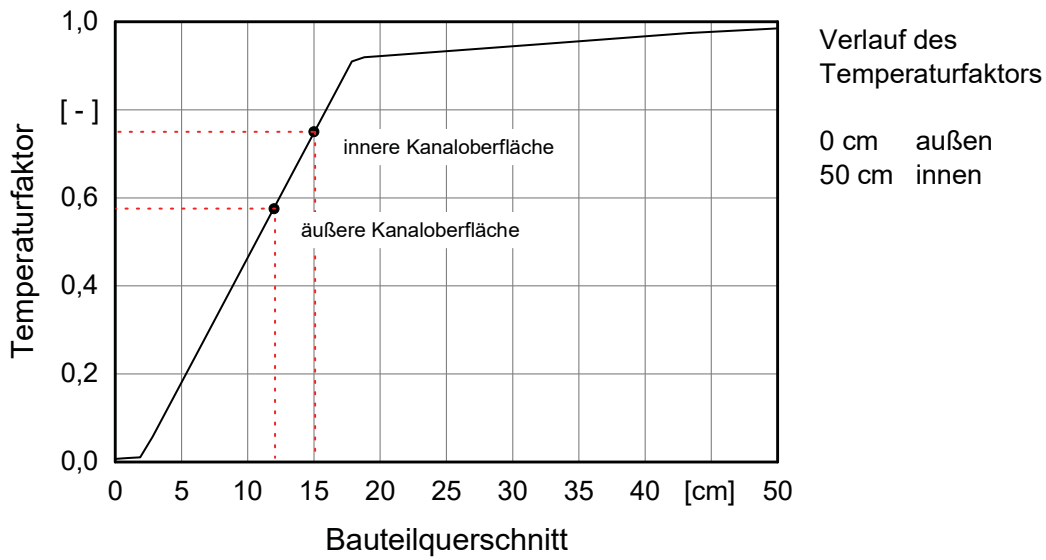


Abb. A 18: Verlauf des Temperaturfaktors entlang des ungestörten Außenwandquerschnitts gemäß der Geometrie aus Abb. 67 (0 cm entspricht der Außenoberfläche und 50 cm der Innenoberfläche des Bauteils)

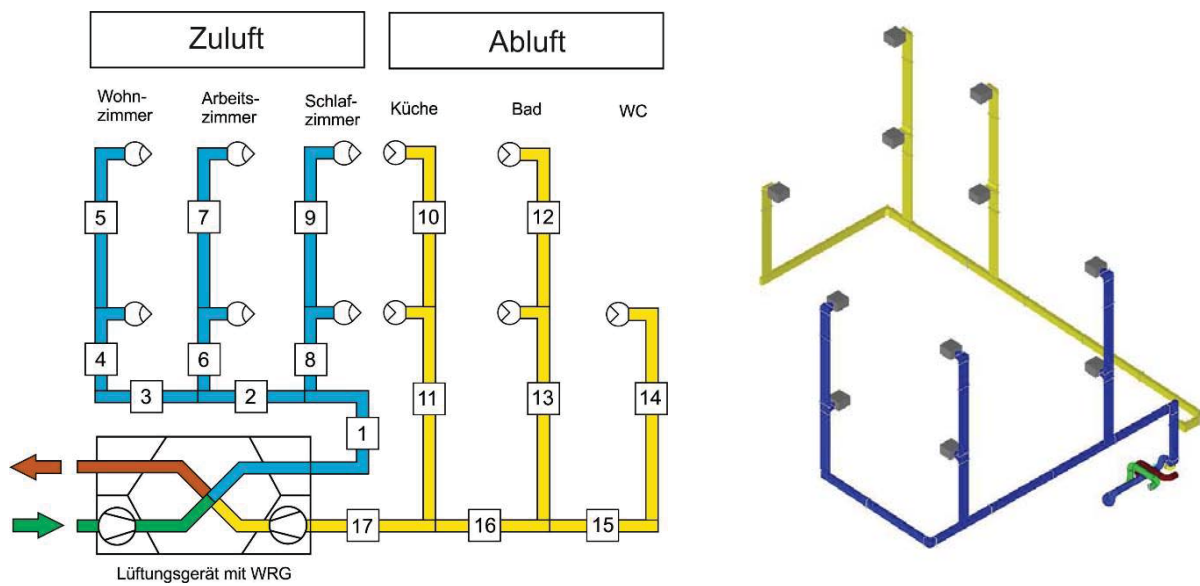


Abb. A 19: Aufteilung der Luftkanalführung in Teilabschnitte gleicher Geometrie und Luftgeschwindigkeit (links) und dreidimensionale Darstellung des Luftkanalnetzes (rechts)

Tab. A 9: Teilabschnitte des Luftkanalnetzes und berechnete Wärmeübergangskoeffizienten

Bez.	Name	Länge [m]	A [m ²]	\dot{V} [m ³ /h]	d_h [m]	w [m/s]	Re [-]	Nu [-]	h_c [W/m ² K]
1	Zuluft1	2,4	0,02	160	0,133	2,222	19583	53,84	10,50
2	Zuluft2	4,4	0,02	120	0,133	1,667	14688	43,06	8,40
3	Zuluft3	4,8	0,02	80	0,133	1,111	9792	34,38	6,705
4	WZEG	2,0	0,009	80	0,0545	2,469	8902	31,04	14,79
5	WZOG	2,8	0,009	40	0,0545	1,235	4451	13,82	6,587
6	AZEG	2,0	0,009	40	0,0545	1,235	4451	14,49	6,907
7	AZOG	2,8	0,009	20	0,0545	0,617	2225	5,068	2,416
8	SZEG	2,0	0,009	40	0,0545	1,235	4451	14,49	6,907
9	SZOG	2,8	0,009	20	0,0545	0,617	2225	5,068	2,416
10	KOG	2,8	0,009	50	0,0545	1,543	5563	17,97	8,567
11	KEG	2,7	0,009	100	0,0545	3,086	11127	35,14	16,75
12	BOG	2,8	0,009	30	0,0545	0,926	3338	9,67	4,607
13	BEG	2,7	0,009	50	0,0545	1,543	5563	18,04	8,598
14	WCEG	2,7	0,009	10	0,0545	0,309	1113	4,42	2,108
15	Abluft3	4,75	0,02	10	0,133	0,139	1224	4,80	0,937
16	Abluft2	3,0	0,02	60	0,133	0,833	7344	26,43	5,154
17	Abluft1	10,0	0,02	160	0,133	2,222	19583	52,39	10,217

Tab. A 10: Materialeigenschaften und bestimmte Ähnlichkeitszahlen für Luft

Medium: Luft 20°C	ρ [kg/m ³]	λ [W/m ² K]	ν [m ² /s]	a [m ² /s]	Pr [-]
		1000	0,026	$15 \cdot 10^{-6}$	$21,8 \cdot 10^{-6}$

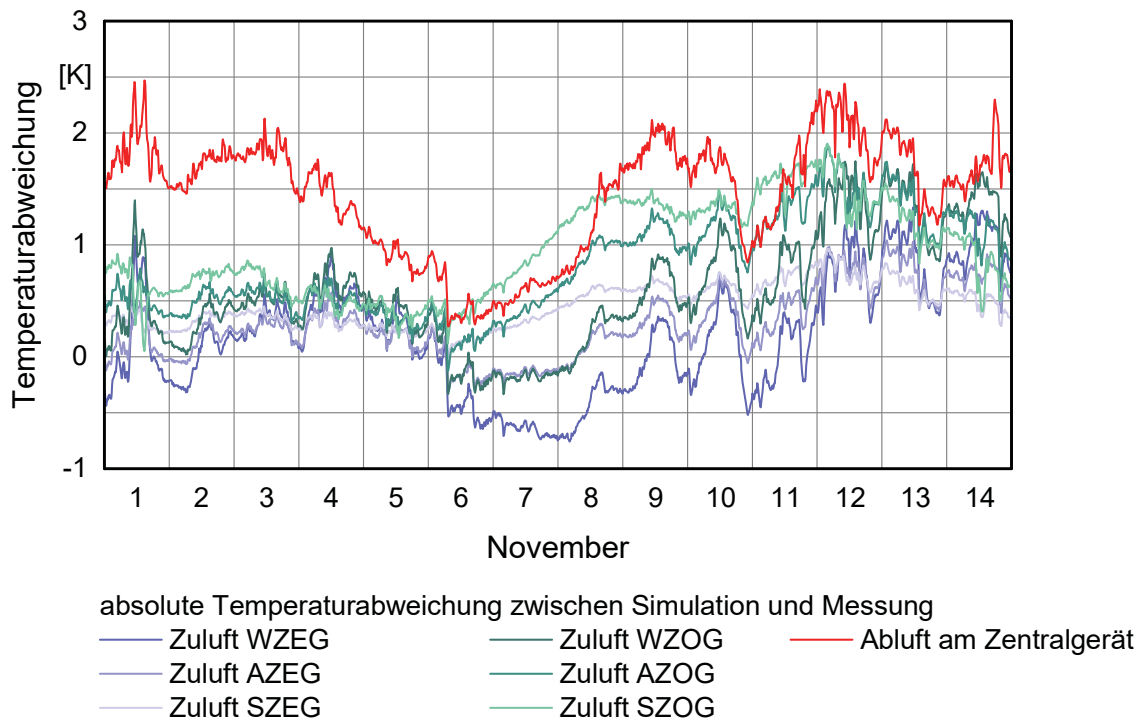


Abb. A 20: Verlauf der absoluten Temperaturabweichungen zwischen Simulation und Messung für die Zulufttemperaturen der Wohnräume und die Ablufttemperatur am Lüftungsgerät während des Messzeitraums im November 2010

Tab. A 11: Gemittelte Winddruckkoeffizienten für Gebäude geringer Größe mit einem Längen-Breiten-Verhältnis von 1:1 und mittlerer Abschirmung nach [Orme et al. 1998)

Außenluftknoten	Windrichtung							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	360°
Süd	-0,2	-0,4	-0,3	0,1	0,4	0,1	-0,3	0,1
Nord	0,4	0,1	-0,3	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	0,1
West	-0,3	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	0,1	0,4	0,1
Ost	-0,3	0,1	0,4	0,1	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4

Tab. A 12: Verwendete Fugendurchlasskoeffizienten für Bestandsfenster- und -türen mit alter und neuer Abdichtung und Strömungsexponent n nach [Orme et al. 1998)

Bauteil	Fugendurchlasskoeffizient C [kg/s] bei 1 Pa		Strömungsexponent n [-]
	alte Dichtung	neue Dichtung	
Innentür	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,6
Außentür	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,6
Fenster	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	0,6

Tab. A 13: Wertepaare aus Druckdifferenz und Volumenstrom für das Kennlinienfeld der Ventilatoren der Lüftungsanlage am Demonstrationsgebäude

Kennlinie	Druckdifferenz [Pa]	Volumenstrom [m³h]
4V	25	120
	35	100
	50	70
	60	50
5V	30	170
	50	140
	65	125
	80	100
	90	80
6V	30	225
	50	210
	75	180
	100	150
	125	115
7V	25	285
	50	265
	100	220
	150	170
	160	160
8V	20	350
	50	330
	100	290
	150	250
	200	200
9V	50	370,8
	100	338,4
	150	306
	200	273,6
	250	230,4

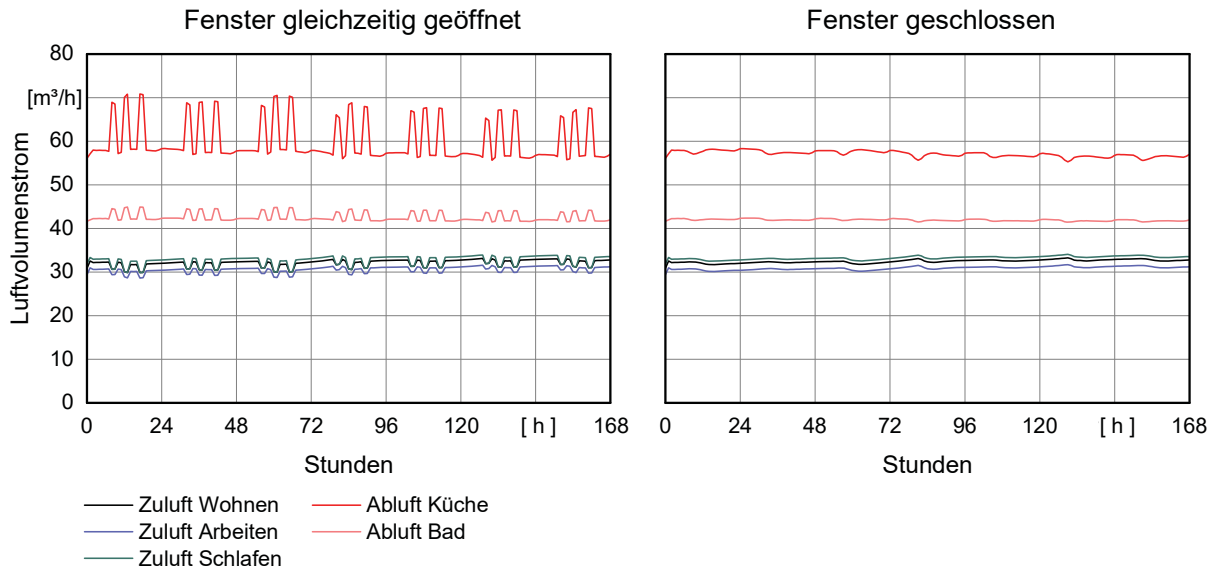


Abb. A 21: Einfluss der Fensterstellung auf die Luftverteilung und die Zu- und Abluftvolumenströme in den einzelnen Räumen im Obergeschoss während der ersten Januarwoche

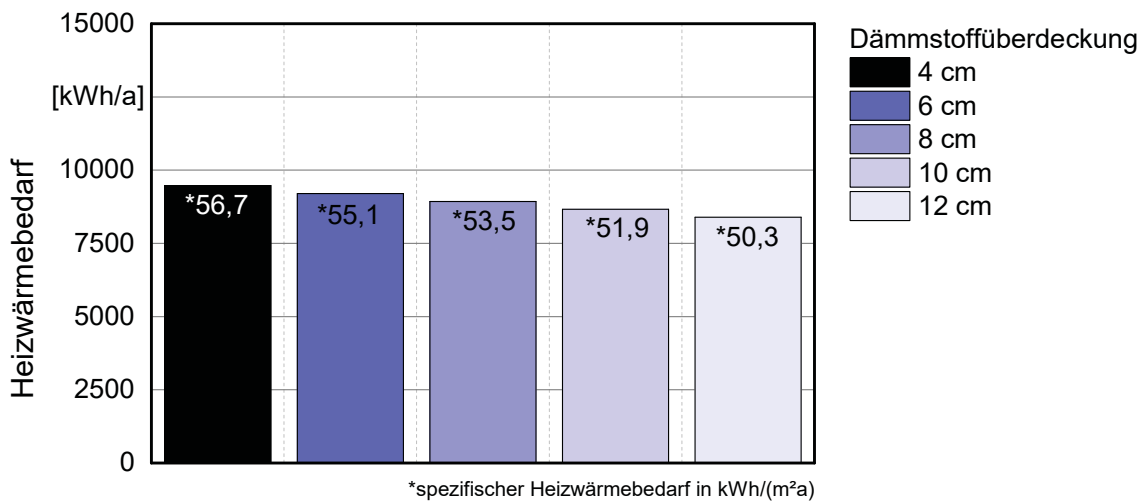


Abb. A 22: Vergleich der Heizwärmebedarfe des sanierten Gebäudes mit Austausch der Fenster bei Variation der Dämmstoffüberdeckung der integrierten Lüftungskanäle

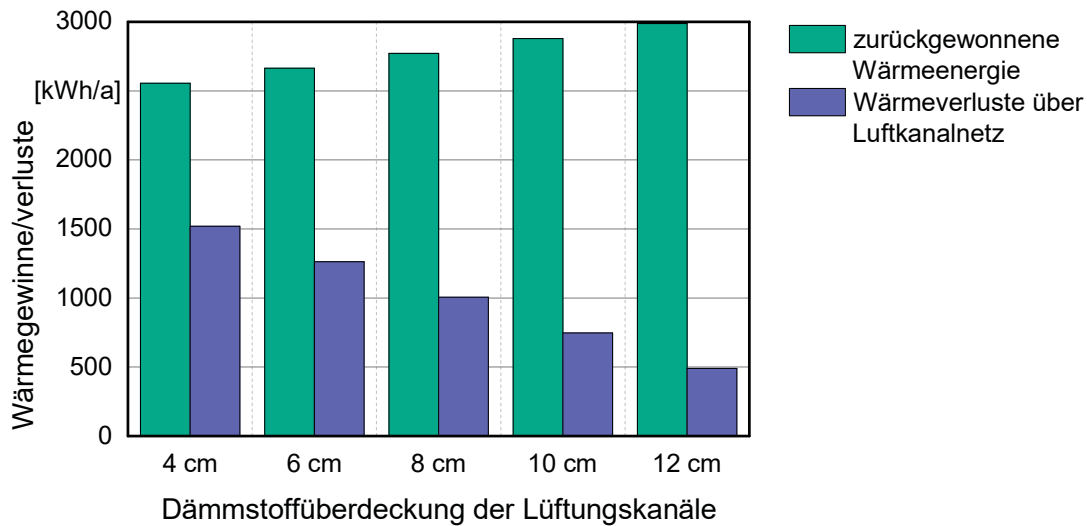










Abb. A 23: Jährliche am Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts zurückgewonnene Wärmeenergie und Gesamtwärmeverluste des Luftkanalnetzes des sanierten Gebäudes mit Fensteraustausch und fassadenintegrierter Luftkanalführung bei variiertes Dämmstoffüberdeckung

Tab. A 14: Häufigkeit, mittlerer spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeinsparpotential für Baualtersklassen des Gebäudetyps EFH für die Sanierung der Gebäudehülle nach [Born et al. 2011]

Ein- und Zweifamilienhäuser	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978
Baualtersklasse	EFH C	EFH D	EFH E	EFH F
Beispielfoto				
Wohnfläche in Mio. m²	173	127	221	213
Anzahl Wohnungen in Tsd.	1720	1240	2150	1930
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	1280	920	1580	1470
Ist-Zustand Heizwärmebedarf in kWh/(m²a)	194	223	166	182
Einsparpotential in %	>50	>50	>45	>45

Tab. A 15: Häufigkeit, mittlerer spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeinsparpotential für Baualtersklassen des Gebäudetyps RH für die Sanierung der Gebäudehülle nach [Born et al. 2011]

Reihenhäuser	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978
Baualtersklasse	RH C	RH D	RH E	RH F
Beispielfoto				
Wohnfläche in Mio. m ²	91	57	76	78
Anzahl Wohnungen in Tsd.	960	570	770	760
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	800	480	670	650
Ist-Zustand Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a)	166	163	135	159
Einsparpotential in %	>40	>40	>45	>40

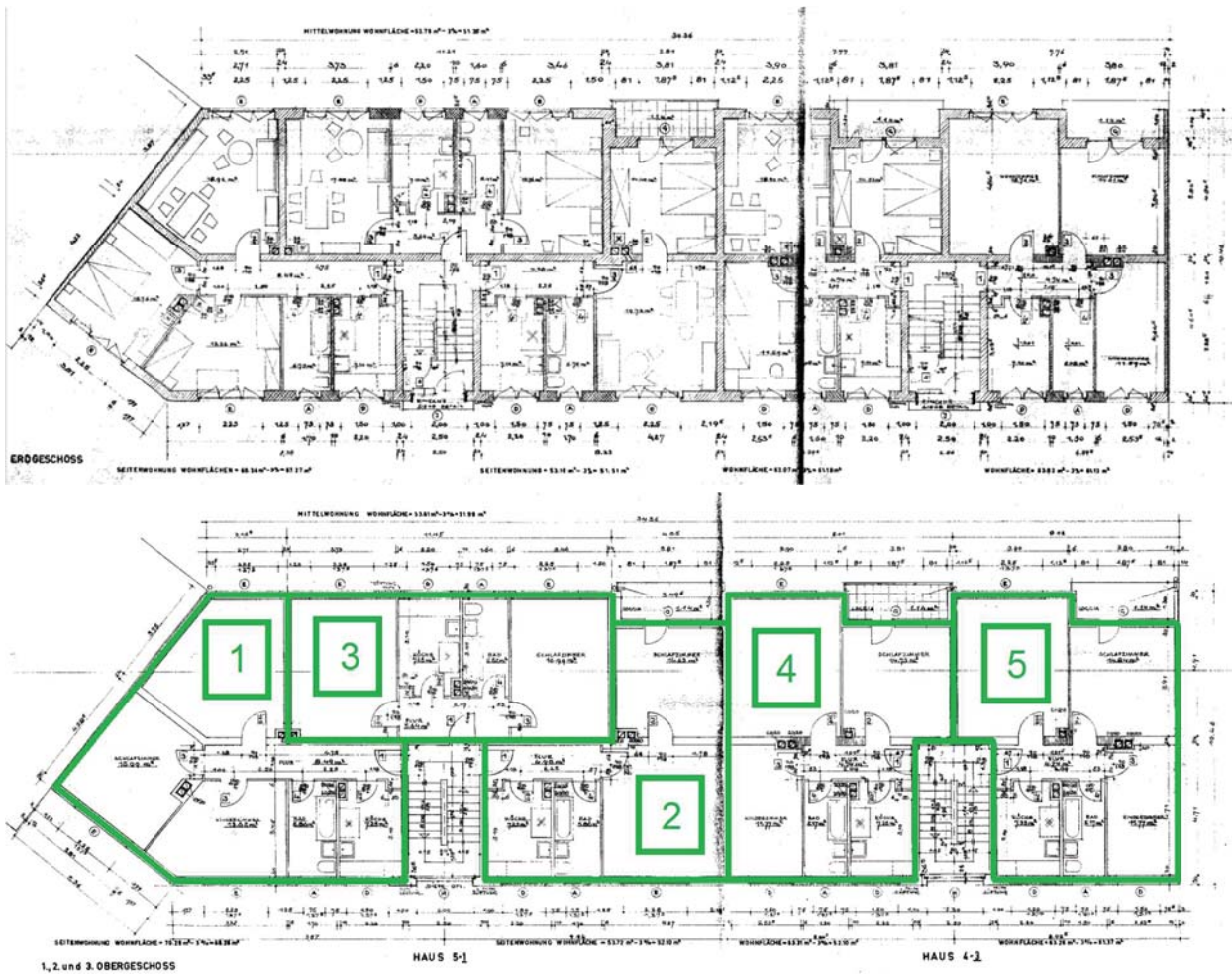


Abb. A 24: Grundriss des EG der Mehrfamilienhäuser 1 und 3 und Bezeichnung der Wohnungen



Abb. A 25: Westansicht der Mehrfamilienhäuser Nauheimer Straße 1-3



Abb. A 26: Ostansicht der Mehrfamilienhäuser Nauheimer Straße 1-3

Tab. A 16: Bauteilaufbauten des MFH im Ausgangszustand vor der Sanierung

Bauteil	Material	d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]
Außenwand U=1,24 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Trümmerstein	0,365	0,61	1800	860
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Innenwand U=1,66 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Trümmerstein	0,24	0,61	1800	860
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Kellerdecke U=3,24 W/(mK)	Zementestrich	0,04	1,4	2000	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Decke	Zementestrich	0,04	1,4	2000	1000

U=0,94 W/(mK)	Trittschalldämmung	0,03	0,04	20	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Oberste Geschossdecke U=0,3 W/(mK)	Zementestrich	0,05	1,4	2000	1000
	Mineralwolle	0,12	0,04	20	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	960
Fenster U _w =2,8 W/(mK)	2-Scheiben- Isolierverglasung				

Tab. A 17: Bauteilaufbauten des MFH im sanierten Zustand gemäß [EnEV 2009]

Bauteil	Material	d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]
Außenwand U=0,17 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Trümmerstein	0,365	0,61	1800	860
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
	EPS WLS 032	0,16	0,032	25	1250
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Innenwand U=1,66 W/(mK)	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	1000
	Trümmerstein	0,24	0,61	1800	860
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Kellerdecke U=0,43 W/(mK)	Zementestrich	0,04	1,4	2000	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Mineralwolle	0,08	0,04	20	1000
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Decke U=0,94 W/(mK)	Zementestrich	0,04	1,4	2000	1000
	Trittschalldämmung	0,03	0,04	20	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Kalkzementputz	0,015	1,0	1800	960
Oberste Geschossdecke U=0,3 W/(mK)	Zementestrich	0,05	1,4	2000	1000
	Mineralwolle	0,12	0,04	20	1000
	Stahlbeton	0,2	2,1	2000	880
	Kalkgipsputz	0,015	0,7	1400	960
Fenster U _w =1,3 W/(mK)	2-Scheiben- Wärmeschutz- Verglasung				

Tab. A 18: Volumenstromdimensionierung für das MFH gemäß [DIN 1946-6] „Nennlüftung“

Wohn- einheit	Raum	Grundfläche [m ²]	Volumen [m ³]	Abluft [m ³ /h]	Zuluft [m ³ /h]
Wohnung 1	Wohnzimmer	18,92	48,25	-	37
	Schlafzimmer	13,32	33,97	-	25
	Kinderzimmer	15,78	40,19	-	25
	Küche	7,10	18,1	43	-
	Bad	5,75	14,7	43	-
	Flur	8,49	21,65	-	-
Wohnung 2	Wohnzimmer	19,73	50,31	-	50
	Schlafzimmer	14,40	36,72	-	33
	Küche	7,10	18,11	42	-
	Bad	5,75	14,66	42	-
	Flur	4,98	12,70	-	-
Wohnung 3	Wohnzimmer	17,88	45,59	-	50
	Schlafzimmer	16,76	42,74	-	33
	Küche	7,10	18,11	42	-
	Bad	5,41	13,80	42	-
	Flur	5,64	14,38	-	-
Wohnung 4	Wohnzimmer	18,90	48,20	-	35
	Schlafzimmer	11,59	29,55	-	23
	Kinderzimmer	14,52	37,03	-	23
	Küche	7,10	18,11	41	-
	Bad	5,08	12,95	41	-
	Flur	4,74	12,09	-	-
Wohnung 5	Wohnzimmer	18,76	47,84	-	35
	Schlafzimmer	11,59	29,55	-	23
	Kinderzimmer	14,61	37,26	-	23
	Küche	7,10	18,11	41	-
	Bad	5,08	12,95	41	-
	Flur	4,74	12,09	-	-

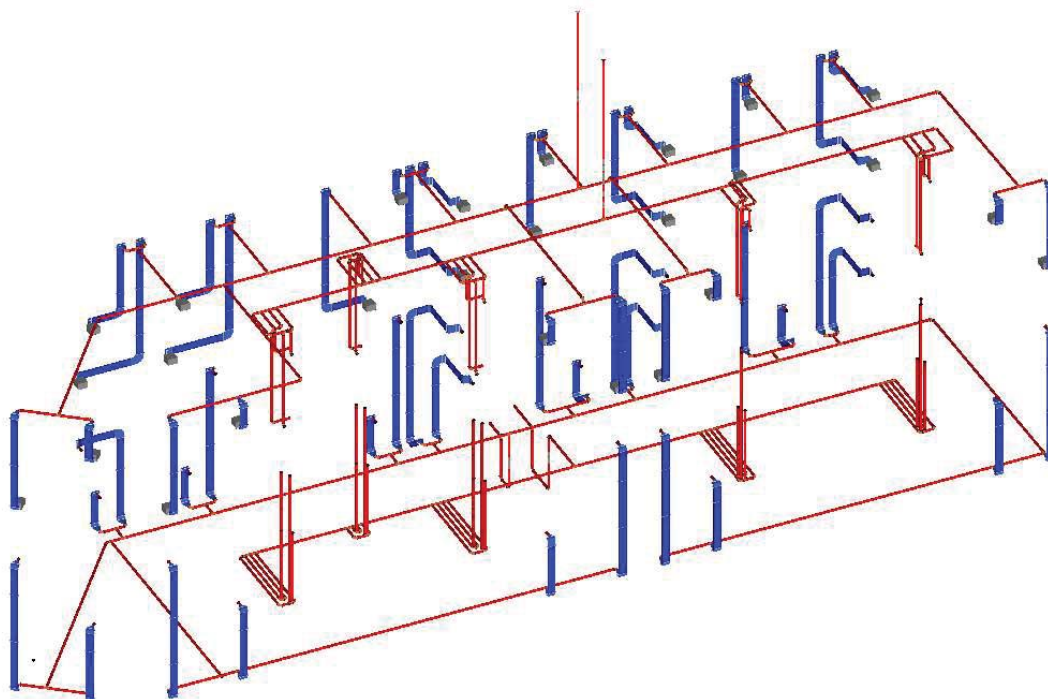


Abb. A 27: Zu- und Abluftkanalnetz des zentralen Lüftungssystems mit zwei Lüftungsanlagen im Keller und auf dem Dachboden, fassadenintegrierte Flachkanäle in Blau, kreisrunde Lüftungsrohre in Rot

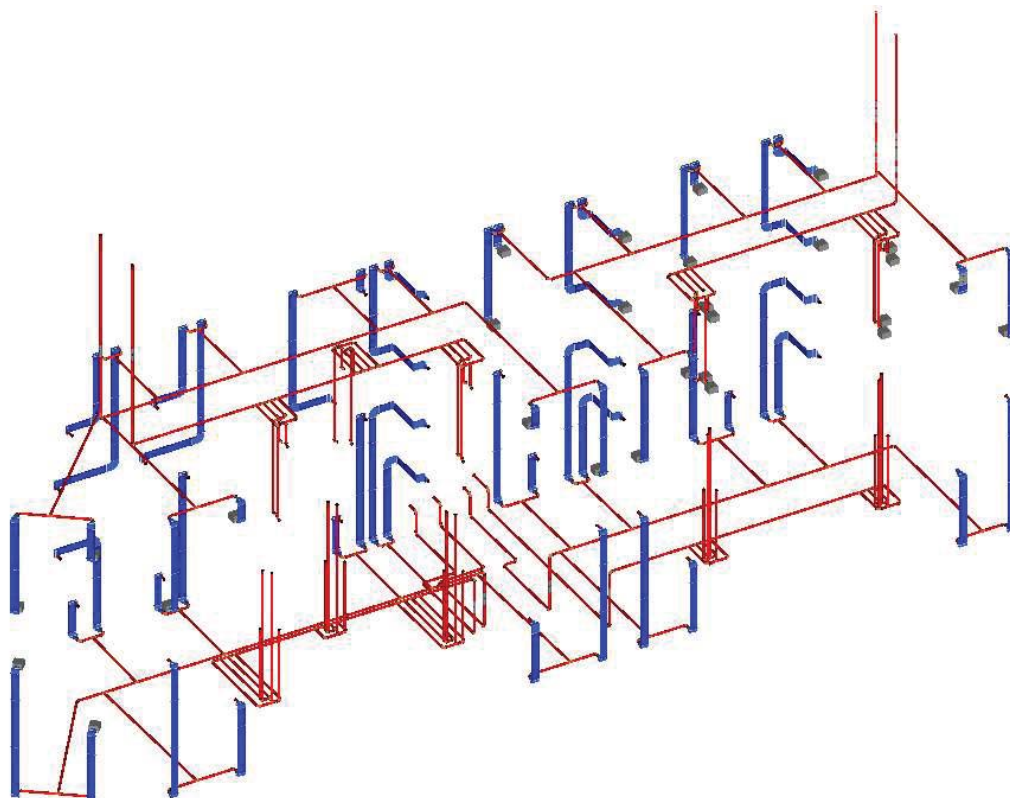


Abb. A 28: Zu- und Abluftkanalnetz des zentralen Lüftungssystems mit vier Lüftungsanlagen im Keller und auf dem Dachboden, fassadenintegrierte Flachkanäle in Blau, kreisrunde Lüftungsrohre in Rot

Tab. A 19: Übersicht der Investitionskosten der baulichen Sanierungsmaßnahmen

Investitionskosten der baulichen Sanierungsmaßnahmen	Menge [m²]	Spezifischer Preis [€/m²]	Kosten [€]
Wärmedämmverbund-System	1.117,3	130	145.249
Fenster austausch	237	330	78.210
Kellerdeckendämmung	380	40	15.200

Tab. A 20: Übersicht der Investitionskosten für die Installation der untersuchten Lüftungssysteme

Investitionskosten der Lüftungstechnik	Lüftungsgeräte [€]	Luftkanäle [€]	Gesamtkosten [€]
zentrales 2-Anlagensystem	14.946	26.096	41.042
zentrales 4-Anlagensystem	21.840	24.090	45.930
wohnungszentrale Lüftungsanlagen	46.313	13.316	59.629

Tab. A 21: Vergleich der jährlichen bedarfsgebundenen Kosten für Gas und Strom für die untersuchten Lüftungssysteme

	jährliche Gasmenge [m³/a]	jährliche Strommenge [kWh/a]
ohne Lüftungsanlage, nur bauliche Sanierung	9.741,42	-
zentrales 2-Anlagensystem	4.168,72	1.451,35
zentrales 4-Anlagensystem	4.237,52	2.288,16
wohnungszentrale Lüftungsanlagen	3.608,44	2.852,57

Anhang B

Kurzbeschreibung des Programmsystems IMEDAS

Das Messtechnik-Programmsystem IMEDAS ist ein internetfähiges Mess-, Steuer- und Regelsystem mit angeschlossener Datenbank und wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen entwickelt. Das Softwaresystem eignet sich für unterschiedlichste Messaufgaben, insbesondere für Langzeitmessungen mit vielen Messkanälen. Zur Archivierung werden die aufgezeichneten Daten per Internet an eine Datenbank versendet. Es können Prozess-Visualisierungen der Messplätze erstellt und diese dann über einen javafähigen Internet-Browser angezeigt werden. Die grafische Darstellung macht aktuelle Vorgänge und Entwicklungen an der Testeinrichtung in Echtzeit sichtbar. Der Datenbankzugriff kann jederzeit an jedem Ort erfolgen und bietet die Möglichkeit, die Messdaten der einzelnen Kanäle auch als Stundenmittelwerte oder Summenwerte für eine spätere Auswertung zu exportieren.

Energieeffiziente und kostengünstige Gebäudesanierungen können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Sanierungsquote im Wohngebäudebestand zu erhöhen. Dabei spielen neben dem erreichbaren Energieeinsparpotential und den Kosten für die Sanierung auch wohnraumhygienische Aspekte eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines Sanierungssystems, bei dem die luftführenden Kanäle für ein zentrales Lüftungssystem direkt in der Fassadendämmung integriert sind. Unter Verwendung eines integralen Ansatzes wird eine Methodik entwickelt, um die Leistungsfähigkeit des Sanierungssystems bestimmen und optimieren zu können. An einem realen Gebäude wird das Betriebsverhalten des Systems mittels einer messtechnischen Analyse untersucht und das strömungstechnische Verhalten der Dämmstoffkanalplatten hydraulisch bewertet. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse, wird das Sanierungssystem mithilfe von thermisch-hydraulisch gekoppelten Gebäudesimulationen gesamtenergetisch analysiert und konventionellen Luftkanalsystemen gegenübergestellt. Das entwickelte Modell wird dazu genutzt, um die Anwendung des Systems auch für den Mehrgeschosswohnungsbau zu ermöglichen.

ISBN 978-3-8396-1503-4



9 783839 615034