

TU

Technische Universität Wien

DISSERTATION

**Hygienischer Tauglichkeitsnachweis und
Optimierung der bauphysikalischen Performance
von Gebäuden in Passivbauweise**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften
unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen DREYER
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Thomas BEDNAR

**Institut für
Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
Abteilung Bauphysik
E 206**

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
Dipl.-Ing. Christian JACHAN
Mat. Nr. 9625355
3542 Gföhl, Bergstraße 30

Wien, im September 2003

Christian Jachan

„Verbrauche keine Energie, sondern verwerte sie.“

Der energetische Imperativ, Wilhelm Ostwald, 1912

Meiner Freundin Pamela und meinen Eltern Josefa und Wilhelm gewidmet.

Außerordentlicher Dank gebührt meinem Doktorvater O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer und meinem Mentor Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar für das Organisieren und Leiten der beiden Forschungsprojekte, an denen ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik mitwirken konnte. Diese Forschungsarbeiten bildeten das thematische und auch das finanzielle Fundament und ermöglichten erst das Erarbeiten der vorliegenden Arbeit.

Besonderen Dank möchte ich Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar einerseits für das gelungene Zusammenwirken bei der Bearbeitung der Forschungsprojekte und andererseits für die hervorragende Betreuung bei der Ausarbeitung der Dissertation aussprechen.

Ganz herzlich gedankt sei Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Kolbitsch für die Begutachtung meiner Arbeit.

Meinen Eltern waren und sind für mich die beste Unterstützung, die ich mir wünschen kann, denn ohne sie wäre ein erfolgreicher Abschluss meines langen Ausbildungsweges kaum möglich gewesen.

Für endlose Geduld und Unterstützung danke ich meiner Freundin Pamela.

Für viele schöne Stunden möchte ich mich bei meinen Kollegen und bei meinen Freuden, besonders bei Christian und Christoph, bedanken.

Die vorliegende Dissertation beinhaltet Untersuchungen zu mehrgeschossigen Passivhäusern und gliedert sich in zwei Hauptabschnitte, der Optimierung der bauphysikalischen Performance (Kapitel 2) und dem hygienischen Tauglichkeitsnachweis von Lüftungsanlagen (Kapitel 4).

Ausgangspunkt war das Projekt „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau“ durchgeführt im Rahmen des Impulsprogramms „Haus der Zukunft“, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Das im Projekt untersuchte mehrgeschossige Passivhaus Utendorfsgasse in Wien bildet die Grundlage der dargestellten Berechnungsbeispiele.

Kapitel 1 beinhaltet Planungsziele zur Sicherstellung von Behaglichkeit und Gesundheit im Innenraum sowie Anforderungen an die Konstruktion und die haustechnischen Anlagen.

In Kapitel 2 wurde eine Methode zur Optimierung der bauphysikalischen Performance, die sich aus dem Heizwärmebedarf, der Heizlast, dem Sommerverhalten und den Kosten zusammensetzt, erarbeitet. Aus der systematischen Variation der Eingangsparameter für die Wanddämmstärke, für den Fenstertyp und die Fenstergröße wird eine bauphysikalisch und kostenmäßig optimierte Konfiguration eines mehrgeschossigen Passivhauses ermittelt. Diese Optimierungsmethode wird beispielhaft am mehrgeschossigen Passivhaus Utendorfsgasse angewandt.

In Kapitel 3 wurde untersucht, ob Glasdoppelfassaden eine wirtschaftliche Alternative zur in Kapitel 2 verwendeten gedämmten Fassade sind. Das Simulationsmodell der Strömung im Fassadenzwischenraum wurde anhand einer Messung an einem Gebäude mit einer Glasdoppelfassade validiert. Diese Messungen wurden für das Projekt „Thermisch-hygrisches Verhalten von Glasdoppelfassaden unter solarer Einwirkung- Theorieevaluierung durch Vorortmessung“ ebenfalls im Impulsprogramm „Haus der Zukunft“ durchgeführt. Im Zuge der Untersuchung wurden die energetischen Eigenschaften verschiedener Wandkonstruktionen mit bzw. ohne Glasdoppelfassade berechnet. Der auf den Berechnungsergebnissen basierende Kosten-/Nutzenvergleich ergab, dass Glasdoppelfassaden beim Vergleich der Investitionskosten und der Aufwendungen für Heizen und Kühlen gedämmten Fassaden unterlegen sind.

Kapitel 4 beinhaltet ein Verfahren zum Nachweis der hygienischen Tauglichkeit von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Zur Berechnung der Verhältnisse im Innenraum und an allen Bauteilen der Lüftungsanlage wurde ein dynamisches Simulationsmodell mit dem Programm *Matlab* und dem zugehörigen Programmaufsatz *Simulink* erstellt. Die Kriterien zur Beurteilung im Hinblick auf die Behaglichkeit und auf die hygienische Zuverlässigkeit sind die Oberflächentemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten.

Die zulässigen Grenzen nach VDI 6022 für die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter werden im berechneten Beispielpassivhaus, das nach den Ergebnisse von Kapitel 2 gestaltet ist, nicht eingehalten. Daher ist bei der untersuchten Lüftungsanlage das Verwenden einer zweiten Filterstufe nach dem Wärmetauscher notwendig.

The dissertation contains investigations on multi-story passive houses and is subdivided into the two main parts, the optimization of the building physical performance (chapter 2) and the hygienically reliability of ventilation systems (chapter 4).

Starting point was the project "*Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau*". This project is part of the program "*Haus der Zukunft*" by the Federal Ministry of traffic, innovation and technology. The passive house *Utendorfsgasse* situated in Vienna is the basis for the presented sample calculations.

In the first chapter planning goals to provide comfort and health for the inhabitants and requirements for the construction and for the ventilation system are presented.

In chapter 2 a method for building physical performance optimization was made including heating requirements, heating load, summer behaviour and costs. Using a systematic variation of the input parameters for the thickness of the insulation of the walls, the types and the size of the windows an optimized configuration of a multi-story passive house is calculated.

Chapter 3 contains an investigation whether glass cavity facades are an economical alternative to conventional facades. A simulation model for air ventilation in the cavity of the facade was validated by a measurement of a building with such a facade. Those measurements were part of the project "*Thermisch-hygrisches Verhalten von Glasdoppelfassaden unter solarer Einwirkung- Theorieevaluierung durch Vorortmessung*", which was also part of the program "*Haus der Zukunft*". In this investigation the energetic characteristics of different wall constructions with and/or without glass cavity facade were calculated. A cost/benefit analysis of the examined variants was made with the computation results. Glass cavity facades have higher investment costs and higher expenditures for heating and cooling as normal facades.

Chapter 4 describes a method to evaluate the hygienically reliability of ventilation systems. For the calculation of the interior climatically conditions and in all units of the ventilation system a dynamic simulation model with the programs *Matlab* and *Simulink* was generated. The surface temperatures and the humidity are the criteria to evaluate the comfort level and the hygienic reliability.

In the calculated example the humidity in the supply air filter exceeds the permitted limits. Therefore a second filter situated behind the heat exchanger is necessary in the investigated ventilation system.

1	Planungsziele von Passivbauten	8
1.1	Einleitung	8
1.2	Allgemeine Behaglichkeitskriterien	8
1.2.1	Behaglichkeit und Gesundheit im Innenraum	8
1.2.2	Thermisch-hygrische Komfortkriterien	11
1.3	Ziele für Passivhäuser	16
1.3.1	Technische Zielgrößen	16
1.3.2	Kontrollierte Wohnraumlüftung	17
1.3.3	Kostenvorgaben	19
2	Optimierung der bauphysikalischen Performance von Gebäuden in Passivbauweise	20
2.1	Einleitung	20
2.2	Grundlegende Untersuchungen.....	20
2.2.1	Wärmeübertragung zwischen Zonen.....	20
2.2.2	Sommerlicher Wärmeschutz.....	33
2.3	Gebäudemodell mit Buildopt.....	37
2.3.1	Kenngößen.....	37
2.3.2	Optimierung	39
2.4	Optimierung der bauphysikalischen Performance.....	43
2.4.1	Passivhaus Utendorfasse	43
2.4.2	Eingaben in Buildopt.....	45
2.4.3	Optimierung	49
2.4.4	Energetischer Nachweis.....	59
2.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	63
3	Energetische Beurteilung von Doppelfassaden.....	64
3.1	Einleitung	64
3.1.1	Arten von durchströmten Fassaden.....	64
3.2	Energieströme durch Fassaden.....	66
3.2.1	Energieströme in einer Glasdoppelfassade	67
3.2.2	Energetische Möglichkeiten einer Doppelfassade	68

3.3	Zu den Messungen.....	69
3.3.1	Unterteilung in Messbereiche	69
3.3.2	Messung „Wand“	70
3.4	Sensorik, Datenloggung und Messcomputer	77
3.5	Messergebnisse	77
3.6	Simulation	80
3.6.1	Modellbildung	80
3.6.2	Simulation von Luftströmen mittels Lüftungsnetzwerk.....	80
3.6.3	Lüftungsöffnungen.....	82
3.6.4	Validierung der Simulation mit Messergebnissen	82
3.6.5	Variationen der Südfassade	84
3.6.6	Ergebnisse.....	86
3.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	89
4	Hygienischer Tauglichkeitsnachweis von Lüftungsanlagen in Gebäuden in Passivbauweise	90
4.1	Einleitung	90
4.2	Anlagenmodell in Simulink.....	90
4.2.1	Zonen	92
4.2.2	Bauteile.....	95
4.2.3	Lüftung.....	100
4.3	Berechnungen mit Anlagenmodell in Simulink.....	102
4.3.1	Modellaufbau	102
4.3.2	Varianten	107
4.3.3	Ergebnisse Winter	108
4.3.4	Ergebnisse Übergang	118
4.3.5	Ergebnisse Sommer	127
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	133
	Literaturverzeichnis	134
	Lebenslauf	138

1 Planungsziele von Passivbauten

1.1 Einleitung

In Kapitel 1 werden Planungsziele für die Sicherstellung von Behaglichkeit und Gesundheit im Innenraum sowie Anforderungen an die Konstruktion und die haustechnischen Anlagen aufgeführt. Der Abschnitt 1.3 bezieht sich auf Passivbauten.

Insbesondere sind in diesem Kapitel die Grenzwerte des Heizwärmebedarfs, der Heizlast, der sommerlichen Überwärmung sowie der Kosten aufgeführt, die in Kapitel 2 bei der Optimierung der bauphysikalischen Performance verwendet werden. Ebenfalls sind die zulässigen Grenzen der Luftfeuchtigkeit an den Zuluftfiltern für den hygienischen Tauglichkeitsnachweis (Kapitel 4) enthalten.

1.2 Allgemeine Behaglichkeitskriterien

Die folgenden Kriterien haben für alle Gebäude Gültigkeit, die für den Aufenthalt von Menschen vorgesehen sind.

1.2.1 Behaglichkeit und Gesundheit im Innenraum

Das Raumklima wirkt auf Behaglichkeit und Gesundheit des Menschen. Gesundheit wird oft als Abwesenheit von Krankheit definiert. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat eine weit umfassendere Definition vorgegeben:

"Gesundheit ist nicht nur das Freisein von Krankheiten und Gebrechen, sondern der Zustand völligen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens". [RIE94] Die WHO hat damit auch die Behaglichkeit entsprechend gewichtet.

Ein Raumklima zu erzeugen, das Behaglichkeit und Gesundheit für alle sichert, ist aufgrund der großen individuellen Streuung in der Empfindung der Einzelnen schwierig. Von Interesse sind alle Parameter, die Einfluss auf Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen haben.

1.2.1.1 Raumlufthqualität

Der Raumnutzer hat zwei Forderungen an die Raumlufth. Einerseits soll die Luft als frisch und angenehm und nicht abgestanden und muffig empfunden werden. Zum anderen darf das Einatmen der Luft kein Gesundheitsrisiko darstellen. [REC00]

1.2.1.2 Luftverunreinigungen

Luftverunreinigungen entstehen durch das Nutzen der Räume und durch den Betrieb von Geräten. Weiters können Schadstoffe von Bauteiloberflächen, Einrichtungen an die Raumlufth abgegeben und von haustechnischen Anlagen oder von Außen eingetragen werden.

Verunreinigungen der Luft bestehen aus unbelebten Stoffen und lebenden Organismen wie: [DIN94]

- Gase und Dämpfe (z.B. CO, CO₂, SO₂, NO₂, NO_x, O₃, Radon, Formaldehyd, Kohlenwasserstoffe)
- Geruchsstoffe (z.B. mikrobielle Abbauprodukte von organischem Material, durch Fäulnisbakterien, menschliche Geruchsstoffe, Ausdünstungen von Baumaterialien)
- Aerosole (z.B. anorganische Stäube wie Fasern oder Schwermetalle, organische Stäube wie Kohlenwasserstoffe und Pollen)
- Bakterien und ihre Sporen (Legionellen, Gasbranderreger)
- Pilze und Sporen

Die maximal zulässige Konzentration gesundheitsschädlicher Stoffe ist in der MAK-Liste (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration), die sich auf eine Expositionszeit im Regelfall von 8 h bezieht, festgehalten. In der ÖNORM H 6000-3 sind die Grenzwerte in Wohnräumen mit 10 % der MAK-Werte angegeben. [ONO89]

Ziel ist, dass die Zuluft zumindest Außenluftqualität aufweist, sofern diese nicht durch außergewöhnliche Belastungen verunreinigt ist. Die Abfuhr der Belastungen im Innenraum erfolgt über einen ausreichenden Luftwechsel.

1.2.1.3 Luftwechsel

Aufenthaltsräume sind ausreichend zu belüften, um eine ausreichende Versorgung mit Frischluft sicherzustellen, und die unerwünschten Beimengungen in der Raumluft zu entfernen.

Der Luftwechsel wird entweder als Volumenstrom in m³/h oder mit einer Luftwechselzahl angegeben, die sich folgendermaßen errechnet:

$$n = \frac{\dot{V}_Z}{V_R} \quad (1.)$$

Dabei bedeuten:

- n Luftwechselzahl in h⁻¹
- \dot{V}_Z Zuluftvolumenstrom in m³/h
- V_R Gesamtes Raumluftvolumen in m³

Für die Bemessung des Luftwechsels ist der jeweils größere der nachfolgenden Mindest-Außenluftvolumenströme maßgeblich.

Personenbezogener Mindest-Außenluftvolumenstrom

Bei Räumen, die vorwiegend zum Aufenthalt von Personen bestimmt sind, stellt das Kohlendioxid eine Luftverunreinigung dar, die proportional zur Raumbesetzung ist. Die ÖNORM H 6000-3 benutzt die CO₂-Konzentration zur Bemessung der hygienischen Luftwechselrate. In Wohnräumen mit Rauchverbot ergeben sich bei einem

CO₂-Volumenanteil in der Außenluft von 350 ppm (parts per million, entspricht Milliliter je Kubikmeter) und bei einer zulässigen CO₂-Konzentration in Räumen von 1000 ppm folgende Anforderungen in Abhängigkeit von der Gesamtwärmeabgabe:

Aktivitätsniveau	Gesamtwärmeabgabe	Mindest-Außenluft-Volumenstrom
ruhig sitzen (z.B. lesen)	100 W	ca. 20 m ³ /h
leichte manuelle Arbeit im Sitzen	120 W	ca. 30 m ³ /h
leichte manuelle Arbeit im Stehen	150 W	ca. 35 m ³ /h
mittelschwere Arbeit	200 W	ca. 45 m ³ /h

Tab. 1 Personenbezogener Mindest-Außenluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Gesamtwärmeabgabe [ONO89]

Um in Räumen mit Raucherlaubnis die gleichen hygienischen Verhältnisse herzustellen, ist der 6-fache Mindest-Außenluftvolumenstrom erforderlich. [ONO89]

Schadstoffbezogener Mindest-Außenluftvolumenstrom

Gelangen aus Produktionsprozessen gesundheitsgefährdende oder luftverunreinigende Stoffe in den Aufenthaltsbereich von Personen (Arbeitsplatz), so ist für jeden dieser Stoffe der Mindest-Außenluftvolumenstrom wie folgt zu berechnen: [ONO89]

$$\dot{V}_{AUL} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_s}{C_{MAK} - C_{AUL}} \quad (2.)$$

Dabei bedeuten:

\dot{V}_{AUL} Zuluftvolumenstrom in l/s

\dot{m}_s Schadstoffanfall in mg/s

C_{MAK} maximale Arbeitsplatz-Konzentration des gesundheitsgefährdenden Stoffes in mg/m³

C_{AUL} Konzentration des Stoffes in der Außenluft in mg/m³

In Aufenthaltsräumen (Wohnräumen) ist in vorgehender Formel C_{MAK} durch $0,1 \cdot C_{MAK}$ zu ersetzen.

In [FEI96] werden Grundwerte der Dimensionierung für Volumenströme in Abluft-räumen angegeben. Diese Werte sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Raum	Volumenstrom
Küchen	60 m ³ /h
Bad	40 m ³ /h
WC, Vorratsraum, etc.	20 m ³ /h

Tab. 2 Grundwerte der Dimensionierung für die Volumenströme in Abluft-räumen

1.2.2 Thermisch-hygrische Komfortkriterien

1.2.2.1 Wärmebilanz des Menschen

Die Körpertemperatur des Menschen wird durch Stoffwechselprozesse auf einem Niveau von ca. 37 °C gehalten. Bei völliger Ruhe im Behaglichkeitszustand beträgt die zur Aufrechterhaltung des Lebens erforderliche Mindestwärmebildung, auch Grundumsatz genannte, rund 80 W. [REC00]

Da die Umgebungstemperatur meist niedriger ist, gibt der Mensch stetig Wärme an seine Umgebung ab. Im Wesentlichen wird sensible Wärme durch Wärmeübertragung von der Haut an die Umgebung durch Wärmeleitung, durch Konvektion und Strahlung, und durch Entwärmung über die Atmung. Latente Wärme wird hauptsächlich durch Ausatmen von Wasserdampf und durch Verdunstung von Wasser auf der Haut (Schwitzen) abgegeben. [ASH97]

In der folgenden Abbildung ist die Zusammensetzung der Wärmeabgabe durch Strahlung, Konvektion und latente Wärmeabgabe in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur dargestellt.

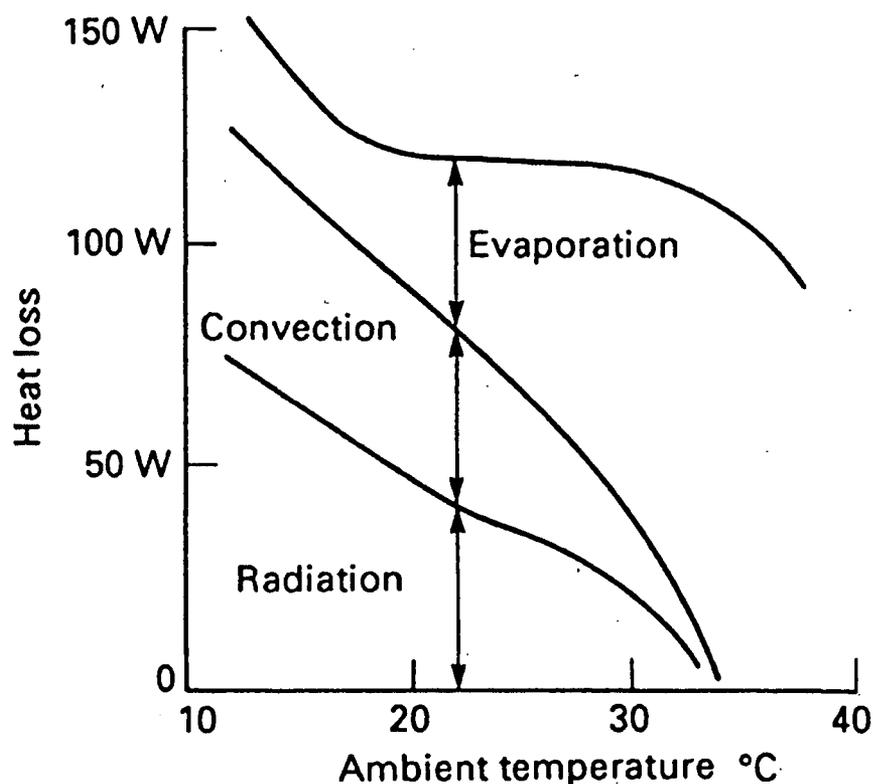


Abb. 1 Zusammensetzung der Wärmeabgabe durch Strahlung, Konvektion und latente Wärmeabgabe in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, entnommen aus: Criteria for Moisture Control, G. W. Brundrett, [BRU90]

Das Verhältnis zwischen sensibler und latenter Wärme ist maßgeblich von den Umgebungsbedingungen und von der Tätigkeit abhängig. Mit zunehmender Umgebungstemperatur steigt der Anteil der latenten Wärmeabgabe.

Besonderen Einfluss auf den Wärmehaushalt des Menschen nehmen neben den thermisch-hygrischen Umgebungsparametern die Bekleidung und die körperliche Betätigung. Zwischen den Menschen sind weitere Unterschiede durch Größe, Alter, Geschlecht, Konstitution usw. bedingt.

1.2.2.2 Oberflächentemperaturen

Die Körperoberfläche des Menschen steht im Strahlungsaustausch mit den Oberflächen seiner Umgebung. Zu große Unterschiede der Umschließungsoberflächentemperaturen, insbesondere zwischen Fenstern und Innenwänden, sind zu vermeiden. In [FEI98] wird die Behaglichkeitsgrenze von Strahlungstemperatur-Asymmetrien mit 2,5 K angegeben.

Die mittlere Strahlungstemperatur wird als diejenige Temperatur aller umgebenden Flächen definiert, die denselben Strahlungswärmeaustausch hervorrufen, wie die tatsächlich unterschiedlichen Oberflächentemperaturen. [RIE94]

1.2.2.3 Raumlufthtemperatur

Die Raumlufthtemperatur ist die mit einem strahlungsgeschützten Thermometer gemessene Temperatur der Luft. Die Körperoberfläche des Menschen steht im konvektiven Wärmeaustausch mit der Raumlufth. Wird die Frischluftversorgung über eine Lüftungsanlage vorgenommen, muss die Zulufttemperatur über 16,5 °C und unter 50 °C liegen. [FEI99a]

1.2.2.4 Empfundene Temperatur

Die empfundene oder operative Temperatur berücksichtigt die Raumlufthtemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung und die kurzweilige Strahlung. Durch kurzweilige Strahlung, z.B. Sonnenstrahlung, erhöht sich die empfundene Temperatur des Menschen. Sie hat unmittelbare Wirkung auf den Wärmehaushalt des Menschen und ist maßgebend für dessen thermische Behaglichkeit. In guter Näherung gilt:

$$t_{\text{empf}} = \frac{t_l + t_u}{2} + \frac{a_{\text{abs}} \cdot I}{\alpha} \quad (3.)$$

Dabei bedeuten:

t_{empf}	Empfundene Temperatur in °C
t_l	Raumlufthtemperatur in °C
t_u	Oberflächentemperatur der Umgebung in °C
a_{abs}	Absorptionsgrad der strahlungsempfangenden Fläche
I	Kurzweilige Strahlung in W/m ²
α	Wärmeübergangskoeffizient in W/m ² K

Durch kurzweilige Strahlung, z.B. Sonnenstrahlung, erhöht sich die empfundene Temperatur des Menschen. In der vorgehenden Gleichung wurde die Asymmetrie der Einstrahlung vernachlässigt.

Zeitliche und örtliche Schwankungen in der empfundenen Temperatur sollten möglichst gering sein. Je weniger die Lufttemperatur und die Temperatur der Umschließungsflächen voneinander abweichen und je mehr sie sich dem Bereich von 20 bis 22 °C nähern, desto gleichmäßiger ist die Entwärmung des Menschen. Der Unterschied Lufttemperatur zu Temperatur der Umfassungsflächen darf maximal 3 K betragen. [REC00] Bei zu großen Unterschieden kommt es zu Zugerscheinungen. Nach DIN ISO 7730 muss die Temperaturdifferenz zwischen 1,1 m und 0,1 m über dem Boden kleiner 3 K sein. [DIN95]

Die untere Grenze des Komfortbereiches für Wohnräume liegt bei 20 °C. Der Überwärmungsbeginn, ab dem die Behaglichkeit beeinträchtigt wird, ist in [ONO99] mit 25 °C in der Nacht und 27 °C am Tag angegeben. DIN ISO 7730 empfiehlt Raumtemperaturen bei leichter sitzender Tätigkeit in der Heizperiode von 22 ± 2 °C und in der Kühlperiode von 23 bis 26 °C. [DIN95]

Aus der österreichischen Studie [ROH01] geht hervor, dass das Temperaturniveau in einzelnen Räumen einer Wohnung von der Raumnutzung abhängt. In einer Wohneinheit sollte es möglich sein, in Wohnräumen ein höheres (20 - 24 °C) und in den Schlafräumen ein niedrigeres (16 - 20 °C) Temperaturniveau einzustellen. Das Badezimmer ist im Mittel kälter als die Wohnräume und während der Benutzung sollte ein höheres Temperaturniveau zur Verfügung stehen.

1.2.2.5 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit hat wesentlichen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen. Sie beeinflusst über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten den Wärmeaustausch des Menschen mit der Umgebung. Zu hohe Geschwindigkeiten machen sich als Zugerscheinungen bemerkbar. Am meisten wird das Wohlbefinden gestört, wenn die bewegte Luft eine geringere Temperatur als die Raumluft hat und vorwiegend aus bestimmter Richtung auf einen Körperteil trifft.

Die Luftbewegung im Raum ist durch regellose örtliche und zeitliche Schwankungen der Luftgeschwindigkeit nach Richtung und Größe gekennzeichnet. Daher ist der Turbulenzgrad der Geschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf das Komfortgefühl des Menschen. Dieser wird mit einer Normalverteilung beschrieben und als Standardabweichung gebrochen durch Mittelwert der Luftgeschwindigkeit definiert. [REC00]

In der folgenden Abbildung sind die Grenzwerte der mittleren Luftgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Turbulenzgrad, für die 10 und 15 % Unzufriedene (siehe PPD-Index) durch Zug zu erwarten sind, dargestellt.

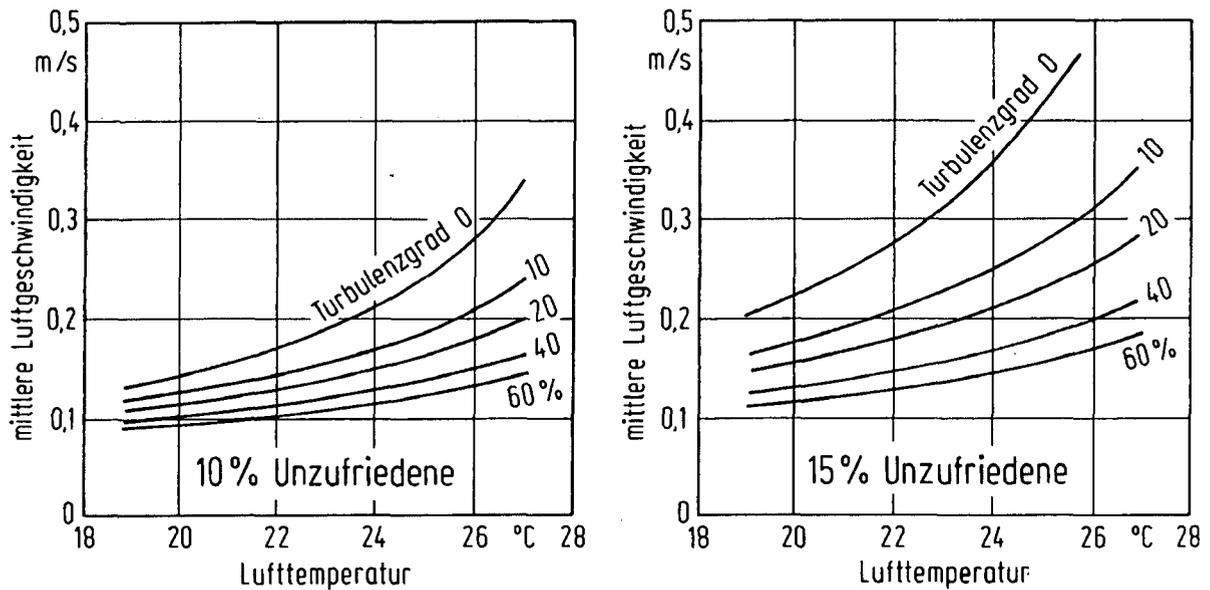


Abb. 2 Grenzwerte der mittleren Luftgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Turbulenzgrad, für 10 und 15 % Unzufriedene, entnommen aus: Raumklimatechnik, H. Rietschel [RIE94]

Zur Ermittlung des Anteils der Unzufriedenen wird der PMV-Index („Predicted Mean Vote“, erwartete mittlere Beurteilung) verwendet, wobei die Abweichung eines realen Raumklimas vom Idealklima beurteilt wird. [FAN72]

DIN ISO 7730 empfiehlt eine mittlere Luftgeschwindigkeit bei leichter sitzender Tätigkeit in der Heizperiode von unter 0,15 m/s und in der Kühlperiode unter 0,25 m/s. [DIN95] Diese Anforderungen entsprechen in etwa den Werten bei Turbulenzgrad 0 und 20 °C Lufttemperatur. Steigt der Turbulenzgrad an, dann muss die zulässige mittlere Luftgeschwindigkeit sinken, um das Komfortniveau zu halten.

1.2.2.6 Luftfeuchtigkeit

Aus hygienischen Gründen sollen 80 % relative Luftfeuchtigkeit an Bauteiloberflächen und an den Bauteilen der Lüftungsanlage, nicht überschritten werden. Ab dieser Grenze wird das Wachstum der Hausstaubmilbe und von Schimmelpilz stark begünstigt.

In der folgenden Abbildung ist der Komfortbereich in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit angegeben.

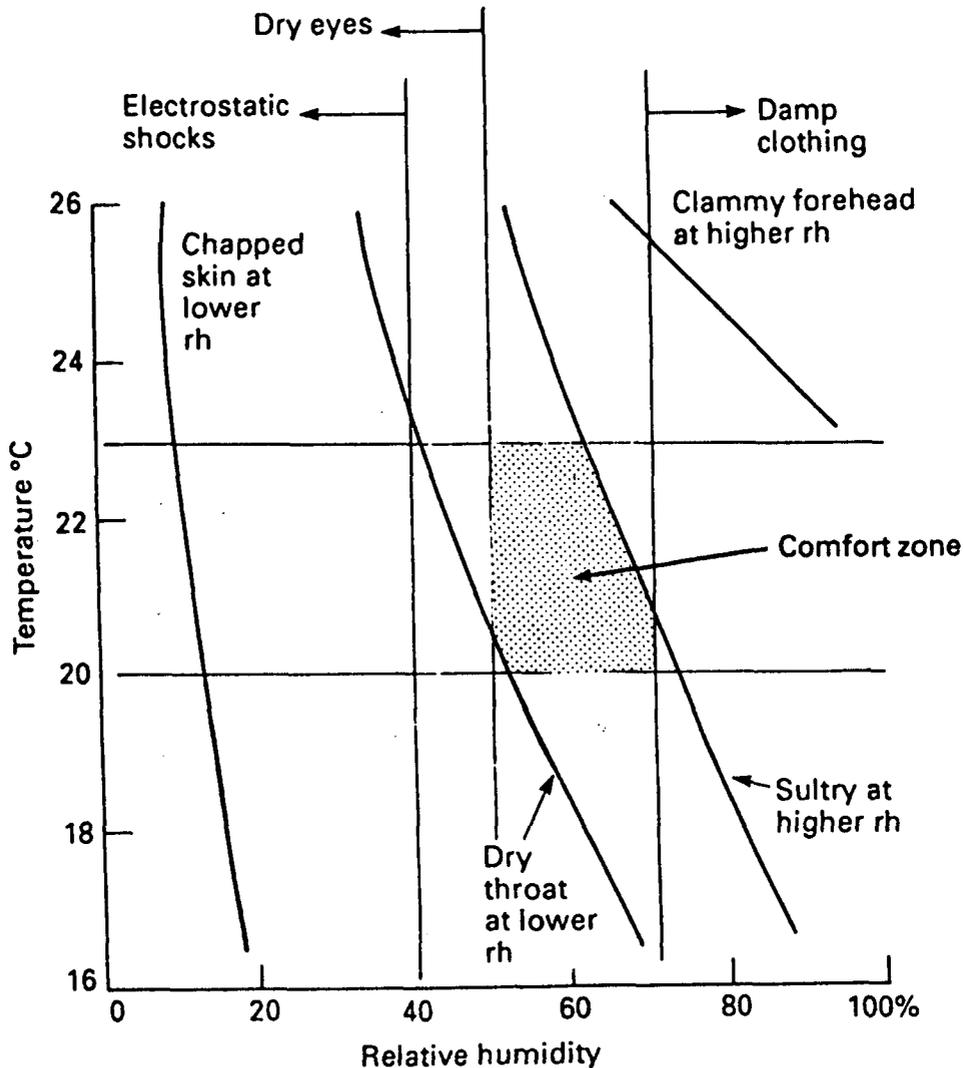


Abb. 3 Komfortbereich in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, entnommen aus: *Criteria for Moisture Control*, G. W. Brundrett, [BRU90]

Die Kernzone des komfortablen Bereichs liegt innerhalb der thermischen Grenzen von 20 und 23 °C. Im Bereich unter 20 % Luftfeuchtigkeit wird die Haut spröde. Unter 40 % Luftfeuchte kommt es vermehrt zu elektrostatischen Entladungen und unter 50 % trocknen die Augen aus.

Unterhalb der Grenzlinie „Dry throat at lower rh“ trocknet der Hals aus. Nach einiger Zeit kann man ein trockenes Gefühl in der Nase, auf den Lippen und in der Luftröhre spüren. Über ca. 72 % Luftfeuchte wird die Kleidung unangenehm feucht. Oberhalb der Grenzlinie „Sultry at higher rh“ ist die Umgebung zu schwül und über der Grenze „Clammy forehead at higher rh“ beginnt man an der Stirn zu schwitzen.

Für raumluftechnische Anlagen mit Feuchteregelung werden in ÖNORM H 6000-3 die Grenzen der Raumlufffeuchtigkeit wie folgt festgelegt: [ONO89]

- obere Grenze: 65 % relative Luftfeuchtigkeit
- untere Grenze: 35 % relative Luftfeuchtigkeit

Der Raumlufffeuchtegehalt ist von der Nutzung (z.B. Kochen, Aktivität der Bewohner) bzw. der Ausstattung (z.B. Anzahl der Pflanzen) abhängig und kann somit in bestimmten Maß vom Nutzer beeinflusst werden.

1.3 Ziele für Passivhäuser

Im Folgenden sind energetische Kriterien und passivhauspezifischen Anforderungen an die Konstruktionen und die haustechnischen Anlagen beschrieben.

1.3.1 Technische Zielgrößen

1.3.1.1 Energieverbrauch

Die Heizlast des Passivhauses muss unter 10 W/m^2 Wohnnutzfläche liegen, um die Zufuhr der benötigten Heizenergie über die Luft zu ermöglichen. Der Heizwärmebedarf wird mit $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ limitiert. Der Primärenergieverbrauch, inklusive Haushaltsverbrauch und Warmwasserbereitung, soll unter $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ liegen. [FEI02]

1.3.1.2 Passivhausqualität der Hülle

Die thermische Hülle der warmen Zone muss ununterbrochen eine Dämmstärke von größer 25 cm aufweisen. [FEI99b] Das entspricht einem U-Wert der opaken Hüllkonstruktion von kleiner $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Das Dämmniveau von Dachkonstruktionen ist meist höher. In der Dämmebene sind Hohlräumen zu vermeiden, da sie den Wärmeverlust durch konvektiven Wärmetransport erhöhen. [FEI99]

Die verwendeten Konstruktionen sind wärmebrückenfrei zu halten. Lineare Wärmebrücken gelten als wärmebrückenfrei, wenn deren Verlustkoeffizienten ψ kleiner $0,01 \text{ W/mK}$ ist. [FEI99b]

1.3.1.3 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit beeinflusst den Wärme- und Feuchtehaushalt einer Konstruktion. Unter Luftdichtheit wird die Verhinderung von konvektiven Strömungen in Richtung des Dampfdruckgefälles verstanden, also das Eindringen von Luft in Bauteile von Innen nach Außen oder gegebenenfalls umgekehrt. Luftdichtheitsebenen werden in der Regel auf der Innenseite von Außenbauteilen angeordnet.

Die von Luftströmen konvektiv mitgeführten Feuchtemengen sind bedeutend größer als der Feuchtetransport durch Diffusion. Infolge von raumseitigen Undichtheiten der Bekleidungsschicht kommt warme, feuchte Raumluft in die Konstruktion und kühlt sich auf den Weg durch die Fuge ab. Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, fällt Wasser aus.

Die Folge sind Bauschäden wie Fäulnis- und Schimmelpilzbildung. Weiters führt Fugenlüftung zu einem erhöhten Wärmebedarf, da kalte Außenluft eindringt bzw. warme Raumluft verloren geht und nicht für die Wärmerückgewinnung zur Verfügung steht.

Die Luftdichtheit ist durch eine geschlossene Hülle mit geeigneten, altersbeständigen Materialien herzustellen. Besonderes Augenmerk ist auf die Ausführung von Anschlusspunkten unterschiedlicher Konstruktionen, Fenster- und Außentüren zu legen. [FEI99] Unvermeidliche Durchstoßpunkte wie die Leitungen der Lüftungsanlage, die Wasserzu- und Ableitung und die Stromzufuhr sind luftdicht anzuschließen.

Die Prüfung der erforderlichen Ausführungsqualität erfolgt mit einer Blower Door Messung. Der zulässige Luftwechsel n_{50} bei der Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich von 50 Pa muss unter der Grenze von $0,60 \text{ h}^{-1}$ liegen. [FEI02]

1.3.2 Kontrollierte Wohnraumlüftung

1.3.2.1 Schallschutzanforderungen

Um die Behaglichkeit des Nutzers nicht einzuschränken, sind bei haustechnischen Anlagen Schallschutzanforderungen an das Gerät und an dessen Leitungen zu stellen. In [ONO01] werden folgende Werte für die Einhaltung des Mindestschallschutzes beim Betrieb von haustechnischen Anlagen vorgegeben:

Betrieb	Anlagengeräuschpegel $L_{AFmax,nT}$ (in dB)
bei einem gleich bleibenden oder intermittierenden Geräusch (z.B. Heizanlage, Pumpe)	25
bei einem kurzzeitig schwankenden Geräusch (z.B. Aufzug, WC-Spülung, Garagentoren)	30

Tab. 3 Mindestschallschutzes beim Betrieb von haustechnischen Anlagen nach Vorschlag ÖNORM B 8115-2

Der durch haustechnische Geräte und Leitungen verursachte maximale Schalldruckpegel muss in Wohnräumen laut Norm unter 25 dB(A) liegen. Im Aufstellraum des Gerätes mit einer Absorptionsfläche von 4 m^2 hat der Schalldruckpegel unter 35 dB(A) zu liegen. [FEI99a] Insbesondere ist auf die Schallübertragung durch die Lüftungsrohrleitung zwischen den Räumen zu achten.

Damit die Lüftungsanlage für die Bewohner tatsächlich unhörbar bleibt, muss der erzeugte Schalldruckpegel unter der Hörschwelle liegen. In der folgenden Tabelle sind die Werte der Bezugshörschwelle für Terzrauschen bei binauralem Hören im diffusen Schallfeld für die Oktavbänder angegeben. [ENI98]

Oktavbandmittelfrequenzen in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000
Hörschwelle in dB	45	28	17	9	5	3	0

Tab. 4 **Bezugshörschwelle**

1.3.2.2 **Hygienische Anforderungen**

An den Bauteilen der Lüftungsanlagen dürfen keine Zustände Auftreten bei denen das Wachstum von Mikroorganismen wie Schimmelpilzen, Bakterien etc. möglich ist. Insbesondere Filter müssen entsprechend der VDI 6022 [VDI02] anlagen- und regelungstechnisch abgesichert werden, sodass die relative Feuchte an den Filtern den Wert von 90 % nicht überschreitet. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass auch die durchschnittliche relative Feuchte innerhalb von drei Tagen nicht höher als 80 % liegt.

Von Bedeutung sind die Filterstandzeiten bzw. die Wartungsintervalle. Mit zunehmender Filterstandzeit kann es zur Anreicherung von Endotoxinen auf der ersten Filterstufe infolge von Abscheidung und dem Zerfall von endotoxinbildenden Bakterien auf den Filtern kommen. Um eine Belastung der Luft durch die Freisetzung der auf Filtern akkumulierten Endotoxine zu vermeiden, müssen die Filter daher in regelmäßigen Abständen (unabhängig vom Verschmutzungsgrad) ausgewechselt werden (1 Jahr bei der 1. Filterstufe bzw. 2 Jahre bei der 2. Filterstufe). [MÖR01]

1.3.2.3 Sonstige Anforderungen

An Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnungssystem werden in [FEI98a], [FEI99] bzw. [FEI00a] strenge Gesamtanforderungen gestellt, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Kriterium	Anforderung
Komfortkriterium	Zulufttemperatur $\geq 16,5$ °C
Effizienzkriterium Wärmeüberträger	effektiver Wärmebereitstellungsgrad ≥ 75 % bei balancierten Massenströmen
Stromeffizienzkriterium	gesamte elektrische Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts bei Standardnutzungsbedingungen $< 0,45$ W pro m^3/h geförderter Luft
Wärmedämmung des Geräts	Dämmung besser als 5 W/K
Abgleich	Zuluft- und Abluft-Massenstrom müssen bei Nennvolumenstrom ausbalanciert werden können
Regelbarkeit	mindestens 3 Stufen: Grundlüftung (~ 70 %); Standardlüftung (100 %); erhöhte Lüftung (~ 130 %)
Frostschutz	ohne Unterbrechung der Frischluftzufuhr und ohne Balancestörung

Tab. 5 Technische Anforderungen an kontrollierte Wohnraumlüftung nach W. Feist, [FEI98a], [FEI99], [FEI00a]

1.3.3 Kostenvorgaben

Die folgenden Angaben für die Bau- und Energiekosten beziehen sich auf das in Kapitel 2 untersuchte Passivhaus des sozialen Wohnbaues in Wien.

1.3.3.1 Baukosten

Die Gesamtbaukosten laut ÖN B1801-1 [ONO95] sollen für das in Kapitel 3 betrachtete Gebäude unter dem kritischen Kostenlimit für den sozialen Wohnbau von 1.055 €/m² Wohnnutzfläche exkl. MwSt. und ohne Nebenkosten wie Planung etc. auf der Preisbasis von 2002 gehalten werden.

1.3.3.2 Energiekosten

Das Ziel für die Energiekosten ist, die Aufwendungen für die Beheizung, die Stromkosten für die Lüftungsanlage und die Kosten für die Warmwasserbereitung zu minimieren. Als Planungsziel werden pro Jahr $7,5$ €/m² Wohnfläche inkl. MwSt. für die oben angeführten Verbräuche angestrebt. Basis für diese Berechnung sind die Tarifangaben der Wienstrom GmbH und der Wiengas (Stand Oktober 2002). [ANW03]

2 Optimierung der bauphysikalischen Performance von Gebäuden in Passivbauweise

2.1 Einleitung

In Kapitel 2, dem ersten Hauptabschnitt der vorliegenden Dissertation, wird die Optimierung der bauphysikalischen Performance vorgestellt, die auf eine umfassende Bewertung eines mehrgeschossigen Passivgebäudes in bauphysikalischer Hinsicht abzielt. Zur bauphysikalischen Performance werden der Heizwärmebedarf, die Heizlast, das Somerverhalten und die Kosten zusammengefasst.

Aus der systematischen Variation der Wanddämmstärke, des Fenstertyps und der Fenstergröße wird eine bauphysikalisch und kostenmäßig optimierte Konfiguration eines mehrgeschossigen Passivhauses ermittelt.

Diese Optimierungsmethode wird beispielhaft am mehrgeschossigen Passivhaus Utendorfgasse angewandt. Die Konfiguration mit optimaler bauphysikalischer Performance bildet die Grundlage des hygienischen Tauglichkeitsnachweises, der im zweiten Hauptabschnitt (Kapitel 4) beschrieben ist.

Für die Wanddämmung ist in diesem Kapitel ein Wärmedämmverbundsystem vorgesehen. Als mögliche Alternative dazu werden in Kapitel 3 verschiedene Glasdoppelfassaden untersucht.

2.2 Grundlegende Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt sind zwei grundlegende Untersuchungen zur Berechnung des Energiehaushaltes und des Somerverhaltens enthalten.

2.2.1 Wärmeübertragung zwischen Zonen

Die Wärmeübertragung zwischen Zonen mit bzw. ohne solare Gewinne wird hier betrachtet. Die Wärmeverteilung über Lüftungsanlagen mit zentraler bzw. dezentraler Wärmerückgewinnung und über Trennbauteile zwischen den Zonen wird verglichen, um den jeweiligen Einfluss auf den Energiehaushalt abschätzen zu können.

Dabei werden verlustminimierte, durchschnittliche und gewinnmaximierte Varianten eines Vierzonenmodells erstellt. Aus diesen Grundtypen werden Variationen mit dezentralen oder zentralen Lüftungsanlagen generiert. Durch starke Verschattung in den beiden unteren Geschossen ergeben sich unterschiedliche solare Einträge in den Zonen. Eine Umverteilung von Gewinnen in die verschatteten Wohnungen und eine damit verbundene Reduktion der Heizwärmebedarfswerte soll untersucht werden.

2.2.1.1 Modell

Das vereinfachte Modell ist einem Passivhauswohnblock nachempfunden und besteht aus vier übereinander liegenden Zonen, mit Innenabmessungen von 6,25 m Breite, 13,90 m Tiefe und 2,5 m Höhe. Die Bruttogeschossfläche (BGF) beträgt ca. 86,88 m². Die Zonen werden allseitig von einer thermischen Hülle bestehend aus mindestens 30 cm Wärmedämmung umschlossen. Zwischen den Zonen werden Wohnungstrenndecken verwendet, die den von der Wiener Bauordnung [BOW03] mindestens geforderten U-Wert von 0,9 W/m²K unterschreiten.

Das Modell wurde im Simulationsprogramm ESP-r [ESR02] aus folgenden Konstruktionen aufgebaut:

Konstruktion	thermisch relevante Schichten (von innen)	Dicke in cm	U-Wert in W/m ² K	angrenzendes Klima
Außenwand (süd-, ost- und nordseitig)	Stahlbeton	20	0,13	Außenklima
	Wärmedämmung	30		
	Außenputz	1		
Oberste Geschossdecke	Stahlbeton	20	0,10	Außenklima
	Wärmedämmung	40		
	Kiesschüttung	5		
Unterste Geschossdecke	Parkett	1,5	0,12	Außenklima
	Estrich	5		
	Stahlbeton	20		
	Wärmedämmung	30		
Fenster	Dreischeibenverglasung	-	0,80	Außenklima
Trenndecke	Parkett	1,5	0,85	Innenklima
	Estrich	5		
	Trittschalldämmung	3		
	Stahlbeton	20		
Wohnungstrennwand (westseitig)	Gipskartonplatte	1,5	0,61	Innenklima-symmetrische Randbedingung
	Dämmung	5		
	Stahlbeton	20		

Tab. 6 verwendete Konstruktionen

Auf der nach Süden orientierten Breitseite sind je nach Variante unterschiedlich große Fenster angeordnet. Nordseitig sind in jedem Geschoss Fenster mit einer Fläche von 4,2 m² angeordnet. Die Fenster weisen einen U_w-Wert von 0,80 W/m²K und einen g-Wert von 0,60 auf.

Die Zonen werden auf 22 °C Innenlufttemperatur beheizt und im Sommer wird auf 26 °C gekühlt, damit eine unrealistische hohe Aufheizung der Speichermassen die Bedarfswerte im Herbst nicht verfälscht. Die inneren Lasten sind mit 2,1 W/m² angesetzt. Der Luftwechsel in den Zonen ist mit 0,5 h⁻¹ festgelegt. Ab einer Lufttemperatur von 24 °C wird in den Zonen ein Fenster gekippt. Die Öffnungsfläche ist mit einer Breite von 0,25 m und einer Höhe von 1 m angesetzt.

Die süd-, ost- und nordseitigen Wände sowie die oberste und die unterste Geschosdecke sind dem Außenklima von Wien des Jahres 1997 ausgesetzt. An den westseitigen Wohnungstrennwänden sind symmetrische Randbedingungen vorgesehen. Die Absorptionsgrade des Außenputzes und der Kiesschüttung sind mit 0,10 angesetzt, um den solaren Eintrag durch die opaken Bauteile gering zu halten. Die Dämmstoffe weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/mK auf.

In der folgenden Abbildung ist das mit dem Simulationsprogramm ESP-r erstellte Modell ersichtlich.

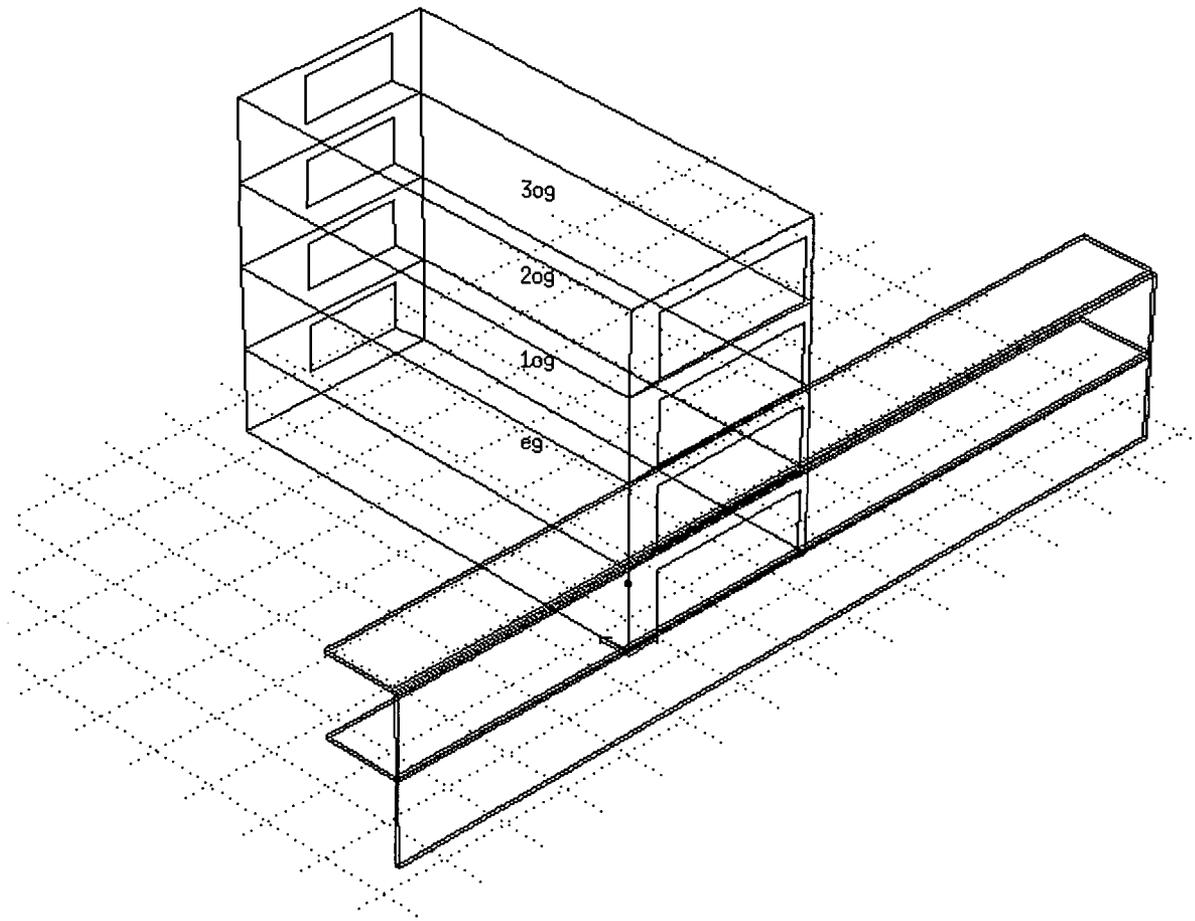


Abb. 4 Vierzonenmodell mit gewinnmaximierter Fensterfläche und den Verschattungselementen erstellt mit ESP-r [ESR02]

Das Erdgeschoss und das 1. Obergeschoss sind jeweils mit einem 2,50 m tiefen und 26 m breiten Balkon und einer 26 m breiten und 2,50 m hohen Wand, die sich 2,50 m vor dem Gebäude befindet, vollständig verschattet.

2.2.1.2 Varianten

Die Luft wird entsprechen der jeweiligen Variante über eine zentrale bzw. über dezentrale Wärmerückgewinnungsanlagen mit einem Wirkungsgrad von jeweils 0,80 geführt. Bei der dezentralen Anlage ist für jede Zone ein eigener Wärmetauscher vorhanden. Die Varianten mit zentraler Anlage sind mit einem Wärmetauscher ausgestattet, der alle Wohneinheiten bedient.

In der folgenden Tabelle sind die zum Vergleich von dezentraler und zentraler Wärmerückgewinnungsanlagen durchgeführten Simulationen aufgelistet.

Variante	Fensteranteil	Fenstergröße in m ²	WRG-Anlage
v-d	verlustminimiert	1,5	dezentrale
v-z	verlustminimiert	1,5	zentrale
d-d	durchschnitt	5,5	dezentrale
d-z	durchschnitt	5,5	zentrale
g-d	gewinnmaximiert	9,5	dezentrale
g-z	gewinnmaximiert	9,5	zentrale

Tab. 7 untersuchte Varianten

2.2.1.3 Ergebnisse

2.2.1.3.1 Heizlast

Die unterschiedlichen Lüftungsanlagen zeigen bei den Lufttemperaturen und den Heizlasten der Varianten mit verlustminimiertem Fensteranteil geringfügige Unterschiede in den Übergangsmonaten.

Die größere Fensterfläche der Varianten mit durchschnittlichem Fensteranteil erhöht die maximale Heizlast und verkürzt die Heizperiode. Die unterschiedlichen Lüftungsanlagen zeigen bei den Lufttemperaturen und den Heizlasten der Varianten mit verlustminimiertem Fensteranteil geringfügige Unterschiede in den Übergangsmonaten.

Bei den Varianten mit gewinnmaximiertem Fensteranteil wird die maximale Heizlast weiter erhöht und auch die Heizperiode wird verkürzt. Die unterschiedlichen Lüftungsanlagen zeigen bei den Lufttemperaturen und den Heizlasten der Varianten mit gewinnmaximiertem Fensteranteil geringfügige Unterschiede.

In der folgenden Grafik sind die Außentemperatur, die Diffusstrahlung, die normale Direktstrahlung und die Heizlasten der Variante v-d im Jänner dargestellt.

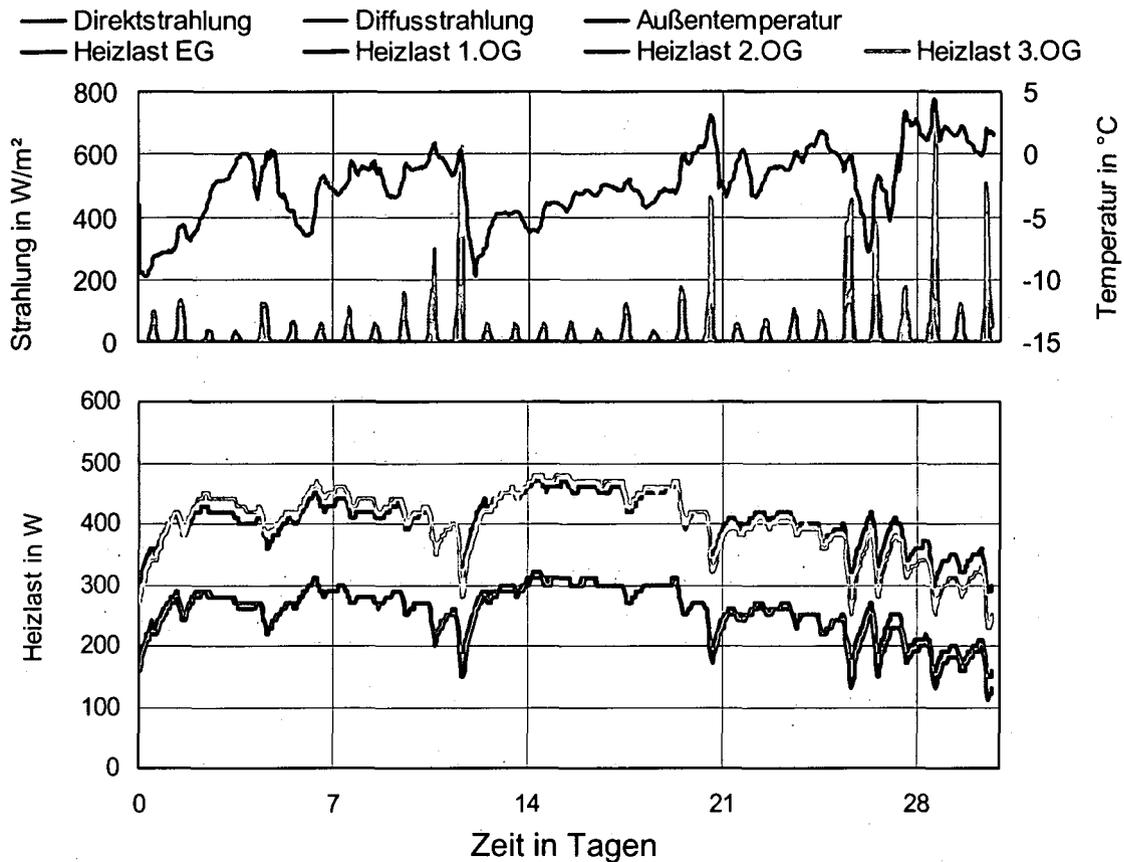


Abb. 5 Außentemperatur, Diffus-, normale Direktstrahlung und Heizlasten von Variante v-d im Jänner

In der folgenden Grafik sind die Heizlasten der Variante v-z im Jänner dargestellt.

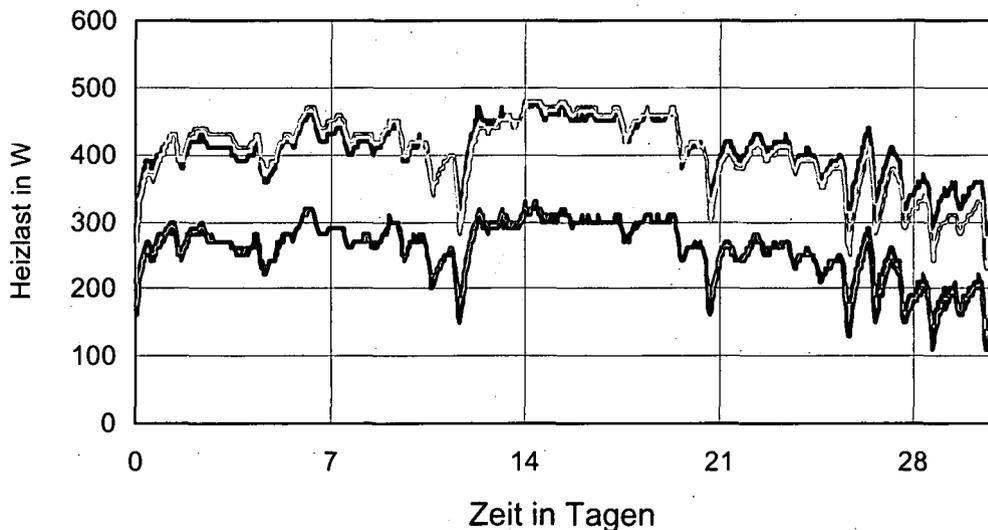


Abb. 6 Heizlasten von Variante v-z im Jänner

Die maximale Heizlast liegt bei den verlustminimierten Varianten bei ca. 480 W bzw. bezogen auf die Wohnnutzfläche von 86,88 m² bei 5,52 W/m².

In der folgenden Grafik sind die Außentemperatur, die Diffusstrahlung, die normale Direktstrahlung und die Heizlasten der Variante **d-d** im Jänner dargestellt.

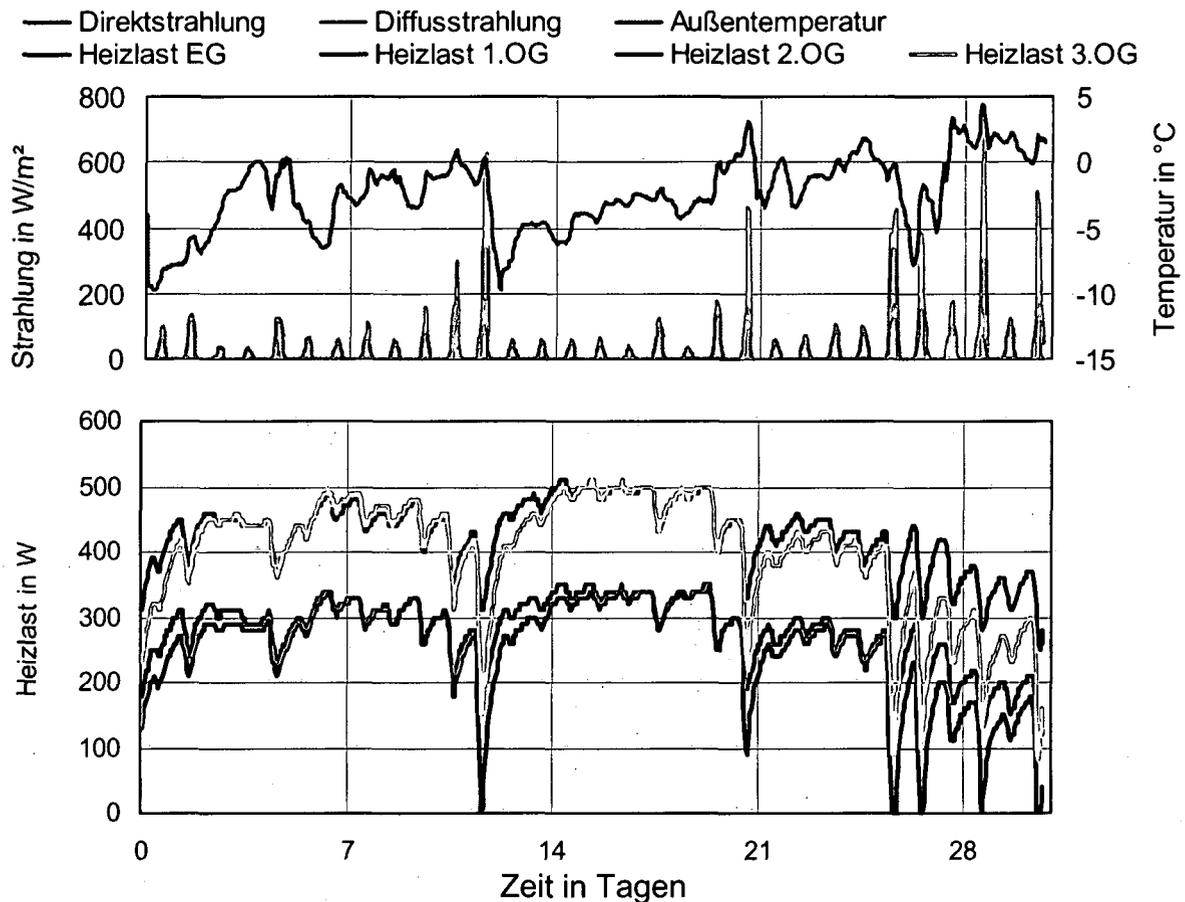


Abb. 7 Außentemperatur, Diffus-, normale Direktstrahlung und Heizlasten von Variante **d-d** im Jänner

In der folgenden Grafik sind die Heizlasten der Variante **d-z** im Jänner dargestellt.

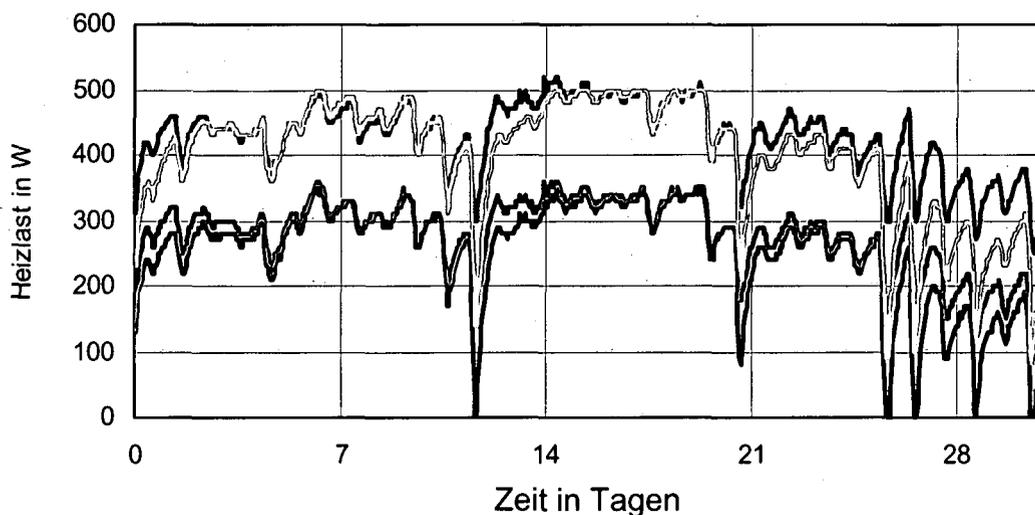


Abb. 8 Heizlasten von Variante **d-z** im Jänner

Die maximale Heizlast liegt bei den verlustminimierten Varianten bei ca. 520 W bzw. bezogen auf die Wohnnutzfläche von 86,88 m² bei 5,98 W/m².

In der folgenden Grafik sind die Außentemperatur, die Diffusstrahlung, die normale Direktstrahlung und die Heizlasten der Variante **g-d** im Jänner dargestellt.

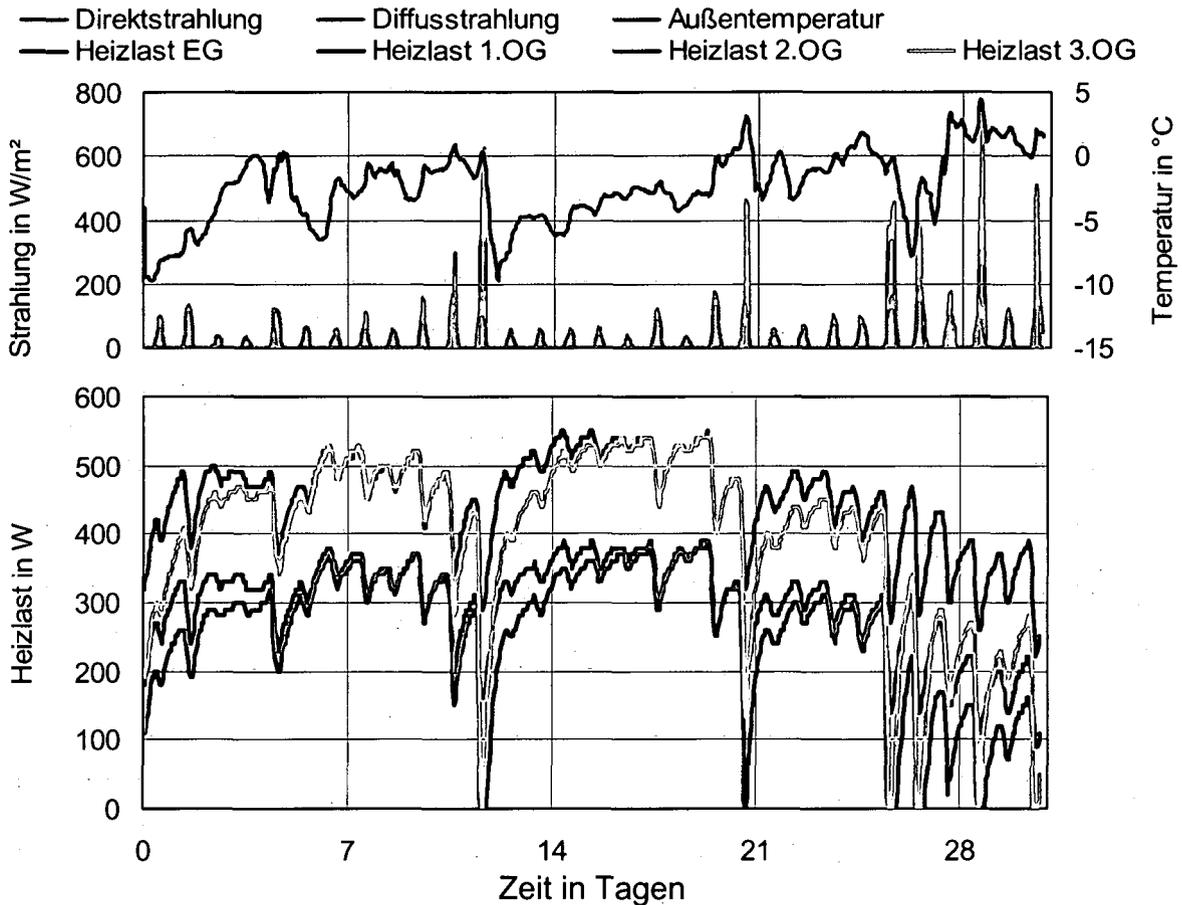


Abb. 9 Außentemperatur, Diffus-, normale Direktstrahlung und Heizlasten von Variante **g-d** im Jänner

In der folgenden Grafik sind die Heizlasten der Variante **g-z** im Jänner dargestellt.

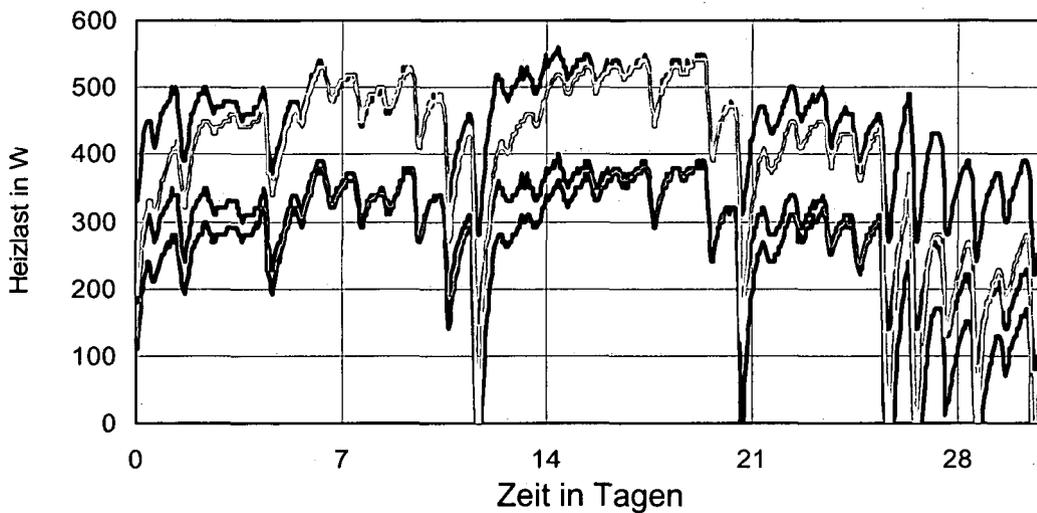


Abb. 10 Heizlasten von Variante **g-z** im Jänner

Die maximale Heizlast liegt bei den verlustminimierten Varianten bei ca. 560 W bzw. bezogen auf die Wohnnutzfläche von 86,88 m² bei 6,45 W/m².

Die Heizlasten der unverschatteten Geschosse werden durch solare Gewinne an strahlungsreichen Tagen deutlich reduziert. Bei den durchschnittlichen und gewinnmaximierten Fensteranteilen sinken die Heizlasten mehrmals auf Null ab. Bei den Heizlasten der Varianten mit dezentraler Wärmerückgewinnung zeigen im Vergleich zu den Varianten mit zentraler Anlage kaum Unterschiede.

In der folgenden Tabelle sind die maximal erforderlichen Heizlasten in W und in W/m² bezogen auf die Bruttogeschossfläche von 86,88 m² der vier Zonen und die Zeitpunkte, an denen diese erstmalig auftreten, aufgelistet.

Variante	Heizlasten in W und Zeitpunkte des Auftretens							
	EG		1.OG		2.OG		3.OG	
v-d	470	15.1.02	320	15.1.02	310	7.1.02	480	15.1.02
	5,41	3:00	3,68	4:00	3,57	6:00	5,52	4:00
v-z	480	14.1.02	330	14.1.02	330	15.1.02	480	15.1.02
	5,52	22:00	3,80	22:00	3,80	8:00	5,52	1:00
d-d	510	15.1.02	350	15.1.02	350	20.1.02	510	16.1.02
	5,87	5:00	4,03	4:00	4,03	7:00	5,87	7:00
d-z	520	14.1.02	360	7.1.02	350	7.1.02	500	7.1.02
	5,98	22:00	4,14	4:00	4,03	2:00	5,76	3:00
g-d	550	15.1.02	390	15.1.02	39	20.1.02	540	17.1.02
	6,33	6:00	4,49	8:00	4,49	7:00	6,22	7:00
g-z	560	15.1.02	400	15.1.02	390	20.1.02	540	18.1.02
	6,45	7:00	4,60	8:00	4,49	2:00	6,22	4:00

Tab. 8 Maximale Heizlasten und Zeitpunkte, an denen diese erstmalig auftreten

Die maximal erforderliche Heizlast, um den Innenraum auf 22 °C zu halten unter Annahme von 2,1 W/m² als innere Lasten, nimmt erwartungsgemäß mit der Fensterfläche zu. Beim Variieren der Lüftungsanlagen ist die maximale Auswirkung auf die Heizlast in den Zonen mit ca. 10 W begrenzt. Die höchste Heizlast von 560 W bzw. 6,45 W/m² BGF ist im Erdgeschoss der Variante g-z erforderlich.

2.2.1.3.2 Mittlere Temperaturen

In der folgenden Tabelle sind die Monatsmittel der Raumlufttemperaturen in °C der untersuchten Varianten im Erd- und im 1. Obergeschoss aufgelistet.

Monat	Erdgeschoss						1. Obergeschoss					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
Februar	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,2	22,0	22,0	22,3	22,3	22,7	22,7
März	22,0	22,1	22,7	22,9	23,4	23,5	22,6	22,5	23,7	23,6	23,7	23,7
Oktober	23,4	23,4	23,7	23,7	23,9	23,9	23,7	23,7	23,9	23,9	24,1	24,1
November	22,1	22,1	22,3	22,4	22,6	22,7	22,5	22,4	22,9	22,9	23,0	23,0
Dezember	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0

Tab. 9 Mittlere Monatstemperaturen im Erd- und im 1. Obergeschoss

In der folgenden Tabelle sind die Monatsmittel der Raumlufftemperaturen in °C der untersuchten Varianten im 2. und im 3. Obergeschoss aufgelistet.

Monat	2. Obergeschoss						3. Obergeschoss					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
Februar	22,1	22,1	23,0	22,9	23,5	23,5	22,0	22,0	22,7	22,7	23,4	23,4
März	23,0	22,9	23,8	23,8	24,1	24,1	22,5	22,5	23,8	23,8	24,0	24,1
Oktober	23,8	23,8	24,2	24,1	24,6	24,5	23,6	23,6	24,1	24,1	24,6	24,6
November	22,7	22,6	23,2	23,2	23,4	23,4	22,4	22,3	23,1	23,1	23,3	23,3
Dezember	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0

Tab. 10 Mittlere Monatstemperaturen im 2. und im 3. Obergeschoss

Ausgehend von 22 °C im Jänner steigt das Temperaturniveau in den Übergangsmo-
naten mit größeren Fenstern entsprechend schneller an. Analog dazu kühlen in den
Übergangsmonaten des Herbstes die Varianten mit großen Gewinnen langsamer
aus.

Zwischen den Varianten mit dezentraler und zentraler Wärmerückgewinnung ist
praktisch kein Unterschied in den Temperaturen vorhanden.

2.2.1.3.3 Heizwärmebedarf

In der folgenden Tabelle sind die Heizwärmebedarfswerte in kWh für ein Jahr der
untersuchten Varianten nach Geschossen aufgelistet.

Geschoss	Heizwärmebedarf in kWh					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
EG	775,8	767,8	715,8	704,7	715,3	702,4
1.OG	415,7	420,7	403,7	405,2	417,5	417,5
2.OG	379,4	385,4	335,9	340,3	337,8	341,9
3.OG	673,0	676,1	564,1	566,6	542,5	544,5
Gesamt	2243,9	2250,0	2019,5	2016,8	2013,1	2006,3

Tab. 11 Heizwärmebedarfswerte für ein Jahr der untersuchten Varianten

Die Heizwärmeverbrauche sinken mit steigender Fensterfläche. Zwischen den Vari-
anten v-d und v-z, d-d und d-z bzw. g-d und g-z unterscheiden sich die errechneten
Gesamtwerte jeweils weniger als 1 %.

Bei den gewinnorientierten Varianten beträgt die Einsparung im Erdgeschoss durch
die zentrale Lüftungsanlage 13 kWh bzw. ca. 2 % des Verbrauches. Im 2. und 3.
Obergeschoss sind die Heizwärmebedarfswerte geringfügig höher, da die in diesen
Zonen erzielten Gewinne ins Erdgeschoss umverteilt werden. Der Heizwärme-
verbrauch im 1. Obergeschoss bleibt konstant bei ca. 417,5 kWh.

2.2.1.3.4 Monatsweiser Heizwärmebedarf

In der folgenden Tabelle sind für die Erdgeschosse der untersuchten Varianten die nach Monaten aufgeschlüsselten Heizwärmebedarfswerte in kWh dargestellt.

Geschoss	Heizwärmebedarf in kWh					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	301,3	302,6	318,1	319,4	335,2	336,3
Februar	139,3	138,6	110,2	102,4	87,5	77,0
März	37,7	31,5	0,9	0,3	0,0	0,0
April	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Oktober	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
November	78,9	75,9	58,8	53,9	52,9	48,6
Dezember	217,6	218,9	227,8	228,7	239,7	240,5
Summe	775,8	767,8	715,8	704,7	715,3	702,4

Tab. 12 monatsweise Heizwärmebedarfswerte der Erdgeschosse

In der folgenden Tabelle sind für die 1. Obergeschosse der untersuchten Varianten die nach Monaten aufgeschlüsselten Heizwärmebedarfswerte in kWh dargestellt.

Geschoss	Heizwärmebedarf in kWh					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	193,3	194,6	207,3	208,6	221,6	222,8
Februar	58,3	58,6	35,2	34,4	24,9	22,9
März	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Oktober	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
November	33,8	35,5	20,8	20,4	18,6	18,2
Dezember	130,2	131,7	140,4	141,8	152,4	153,6
Summe	415,7	420,7	403,7	405,2	417,5	417,5

Tab. 13 monatsweise Heizwärmebedarfswerte der 1. Obergeschosse

In der folgenden Tabelle sind für die 2. Obergeschosse der untersuchten Varianten die nach Monaten aufgeschlüsselten Heizwärmebedarfswerte in kWh dargestellt.

Geschoss	Heizwärmebedarf in kWh					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	187,9	189,3	187,1	188,5	188,7	190,4
Februar	36,4	37,3	5,9	6,4	0,9	1,0
März	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oktober	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,6
November	27,3	29,5	11,3	12,2	8,9	9,7
Dezember	127,8	129,3	131,6	133,2	138,5	140,2
Summe	379,4	385,4	335,9	340,3	337,8	341,9

Tab. 14 monatsweise Heizwärmebedarfswerte der 2. Obergeschosse

In der folgenden Tabelle sind für die 3. Obergeschosse der untersuchten Varianten die nach Monaten aufgeschlüsselten Heizwärmebedarfswerte in kWh dargestellt.

Geschoss	Heizwärmebedarf in kWh					
	v-d	v-z	d-d	d-z	g-d	g-z
Jänner	299,0	299,3	296,2	296,5	292,9	293,2
Februar	92,4	91,8	19,6	19,9	3,6	3,8
März	1,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Oktober	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
November	65,2	67,2	30,9	32,0	23,7	24,4
Dezember	215,0	215,7	217,4	218,2	222,2	223,1
Summe	673,0	676,1	564,1	566,6	542,5	544,5

Tab. 15 monatsweise Heizwärmebedarfswerte der 3. Obergeschosse

Im Jänner und Dezember, den Kernmonaten der Heizperiode, treten praktisch keine Unterschiede zwischen den Varianten mit dezentraler und zentraler Wärmerückgewinnung auf. Die erzielten Gewinne mindern direkt den Heizwärmebedarf.

Die Verwendung von Lüftungsanlagen mit zentraler Wärmerückgewinnung bewirkt zunehmend mit der Fensterfläche in den Übergangsmontaten eine Umverteilung von Gewinnen aus den besonnten Zonen in die verschatteten Geschosse. Daher liegen im Erdgeschoss in den betreffenden Monaten niedrigere Verbrauchswerte vor. Im Erdgeschoss der gewinnorientierten Variante wird er Heizwärmebedarf um rund 13,5 % gesenkt. Auf die Verbrauchswerte des verschatteten 1. Obergeschosses und der anderen unverschatteten Obergeschosse ergeben sich keine bedeutsamen Einflüsse.

2.2.1.3.5 Energiebilanzen

Der Energiehaushalt der vier Zonen wird für die gewinnorientierten Varianten detailliert betrachtet. In der folgenden Tabelle sind die Energiebilanzen in kWh der Erdgeschosse von Variante g-d und g-z für Jänner, Februar und März dargestellt.

Wärmegewinne und Wärme- verluste in kWh im EG durch:	Jänner		Februar		März	
	g-d	g-z	g-d	g-z	g-d	g-z
Wände	-115,5	-115,5	-104,0	-105,3	-110,7	-109,8
Unterste Geschossdecke	-148,7	-148,7	-141,4	-142,9	-145,5	-144,9
Trenndecke zum 1.OG	18,8	18,7	23,0	21,0	17,8	17,3
Fenster Süd	-101,9	-101,9	-37,0	-37,2	-15,8	-16,1
Fenster Nord	-44,8	-44,8	-17,0	-17,1	-8,4	-8,5
direkte Solargewinne	64,2	64,2	163,3	163,3	251,5	251,5
Lüftungsverluste	-142,9	-144,1	-96,9	-81,3	-124,5	-125,1
interne Gewinne	135,8	135,8	122,6	122,6	135,8	135,8
Heizung	335,2	336,3	87,5	77,0	0,0	0,0
Summe der Verluste	-553,9	-555,1	-396,3	-383,9	-404,9	-404,4
Summe der Gewinne	554,0	555,1	396,4	383,9	405,0	404,6

Tab. 16 Energiebilanz in kWh der Erdgeschosse von Variante g-d und d-z für Jänner, Februar und März

In der folgenden Tabelle sind die Energiebilanzen in kWh der 1. Obergeschosse von Variante g-d und g-z für Jänner, Februar und März dargestellt.

Wärmegewinne und Wärmeverluste in kWh der 1.OG durch:	Jänner		Februar		März	
	g-d	g-z	g-d	g-z	g-d	g-z
Wände	-118,3	-118,3	-115,9	-116,1	-106,4	-106,6
Trenndecke zum EG	-18,4	-18,4	-56,4	-55,9	-33,7	-32,0
Trenndecke zum 2.OG	7,4	7,4	31,1	29,1	32,8	31,7
Fenster Süd	-103,8	-103,8	-42,4	-42,5	-17,8	-17,9
Fenster Nord	-45,6	-45,6	-19,0	-19,1	-9,9	-10,0
direkte Solargewinne	64,2	64,2	160,2	160,2	247,9	247,9
Lüftungsverluste	-142,9	-144,1	-105,0	-101,1	-248,7	-248,9
interne Gewinne	135,8	135,8	122,6	122,6	135,8	135,8
Heizung	221,6	222,8	24,9	22,9	0,0	0,0
Summe der Verluste	-429,0	-430,1	-338,7	-334,7	-416,5	-415,3
Summe der Gewinne	429,0	430,2	338,8	334,8	416,6	415,4

Tab. 17 Energiebilanz in kWh der 1. Obergeschosse von Variante g-d und d-z für Jänner, Februar und März

In der folgenden Tabelle sind die Energiebilanzen in kWh der 2. Obergeschosse von Variante g-d und g-z für Jänner, Februar und März dargestellt.

Wärmegewinne und Wärmeverluste in kWh der 2.OG durch:	Jänner		Februar		März	
	g-d	g-z	g-d	g-z	g-d	g-z
Wände	-119,4	-119,4	-129,9	-129,8	-108,0	-107,9
Trenndecke zum 1.OG	-8,0	-8,0	-77,6	-75,7	-36,7	-35,6
Trenndecke zum 3.OG	-20,3	-20,3	-54,2	-53,9	-19,1	-17,0
Fenster Süd	-89,7	-89,7	29,4	29,5	55,4	55,4
Fenster Nord	-45,8	-45,8	-21,0	-20,9	-11,0	-11,0
direkte Solargewinne	101,8	101,8	348,5	348,5	422,8	422,8
Lüftungsverluste	-142,9	-144,7	-218,5	-221,0	-439,3	-442,6
interne Gewinne	135,8	135,8	122,6	122,6	135,8	135,8
Heizung	188,7	190,4	0,9	1,0	0,0	0,0
Summe der Verluste	-426,1	-427,9	-501,2	-501,4	-614,0	-614,1
Summe der Gewinne	426,3	428,0	501,4	501,6	614,1	614,1

Tab. 18 Energiebilanz in kWh der 2. Obergeschosse von Variante g-d und d-z für Jänner, Februar und März

In der folgenden Tabelle sind die Energiebilanzen in kWh der 3. Obergeschosse von Variante **g-d** und **g-z** für Jänner, Februar und März dargestellt.

Wärmegewinne und Wärmeverluste in kWh der 3.OG durch:	Jänner		Februar		März	
	g-d	g-z	g-d	g-z	g-d	g-z
Wände	-117,3	-117,3	-130,5	-130,7	-106,0	-106,1
Trenndecke zum 2.OG	20,6	20,5	-0,5	-1,1	22,8	21,0
Oberste Geschossdecke	-157,3	-157,4	-161,1	-161,5	-114,2	-114,4
Fenster Süd	-88,3	-88,3	30,7	30,7	56,4	56,2
Fenster Nord	-45,1	-45,1	-20,4	-20,4	-10,6	-10,7
direkte Solargewinne	101,8	101,8	348,5	348,5	422,8	422,8
Lüftungsverluste	-142,9	-143,2	-192,8	-191,9	-407,0	-404,6
interne Gewinne	135,8	135,8	122,6	122,6	135,8	135,8
Heizung	292,9	293,2	3,6	3,8	0,0	0,0
Summe der Verluste	-550,9	-551,2	-505,3	-313,3	-444,4	-444,2
Summe der Gewinne	551,0	551,3	505,4	313,5	444,5	444,2

Tab. 19 Energiebilanz in kWh der 3. Obergeschosse von Variante **g-d** und **d-z** für Jänner, Februar und März

Die Gewinne und Verluste der Varianten **g-d** und **g-z** sind im Jänner und März in allen Geschossen praktisch gleich.

Die Installation einer zentralen Lüftungsanlage reduziert den Lüftungswärmeverlust des Erdgeschosses im Februar von rund 97 kWh bei Variante **g-d** auf ca. 81 kWh bei Variante **g-z**. Der Zustrom aus dem 1. Obergeschoss sinkt um ca. 2 kWh und der Heizwärmeverbrauch wird um ca. 10,5 kWh vermindert. Die restliche Einsparung geht über die Außenbauteile verloren, da höhere Lufttemperaturen im Erdgeschoss bei Variante **g-z** die Verluste vergrößern. Über die Trenndecke zum 1. Obergeschoss gelangen ca. 18,7 kWh ins Erdgeschoss.

Das Erdgeschoss weist in Variante **g-z** einen Zufluss aus dem 1. Obergeschoss von 21 kWh auf. Über die Zonengrenze „Trenndecke zum EG“ verlassen 55,9 kWh im Februar das 1. Obergeschoss. In diesem Monat erwärmen sich die Trenndecke um ca. 2 °C, was die verbleibenden 34,9 kWh erfordert.

Vom besonnten 2. Obergeschoss gelangen rund 7,4 kWh ins 1. Obergeschoss und es werden ca. 18,4 kWh ans Erdgeschoss abgegeben. Im Februar wird in Variante **g-z** der Lüftungswärmeverlust im Vergleich zu Variante **g-d** um ca. 4 kWh und der Heizwärmebedarf um rund 2 kWh verringert. Der Zustrom vom 2. Obergeschoss wird um 1 kWh und die Abgabe in das Erdgeschoss um 0,5 kWh reduziert. Analog zum Erdgeschoss geht der restliche Eintrag über die Außenbauteile verloren.

Das 3. Obergeschoss weist im Jänner und März Gewinne über die Trenndecke zum 2. Obergeschoss auf. Im Übergangsmonat Februar ist die Bilanz dieser Grenze annähernd ausgeglichen. Die Erwärmung der Trenndecke zwischen dem 2. und 3. Obergeschoss um ca. 4 °C erfolgt zur Gänze durch den Energiestrom, der das 2. Obergeschoss verlässt.

2.2.1.4 Schlussfolgerung zur Wärmeübertragung

In den Übergangsmonaten profitiert das Erdgeschoss von der zentralen Lüftungsanlage. Die erzielbare Einsparung liegt bei jeder Fenstergröße im Erdgeschoss unter 2 % und in Summe unter 1 % des Heizwärmebedarfes. Die Art der Wärmerückgewinnungsanlage ist in energetischer Hinsicht nicht wesentlich.

Die Gewinnweitergabe der besonnten Zonen in das 1. Obergeschoss erfolgt hauptsächlich durch die Trenndecke und kann durch eine zentrale Lüftungsanlage praktisch nicht gesteigert werden. Eine Unterscheidung bei der Berechnung des Heizwärmebedarfes nach ÖNORM EN 832 [ONO98] zwischen dezentraler und zentraler Wärmerückgewinnung ist nicht notwendig.

2.2.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Im Hinblick auf die Einhaltung der Behaglichkeitskriterien ist sommerliche Überwärmung der Wohnräume durch bauliche Maßnahmen zu vermeiden. Mit dem im Folgenden vorgestellten Berechnungsverfahren können Gebäude nach ihrer sommerlichen Tauglichkeit klassifiziert werden.

2.2.2.1 Berechnungsverfahren

Das in [ROV00] vorgestellte Berechnungsverfahren für das sommerliche Verhalten von Gebäuden ist eine Weiterentwicklung der ÖNORM EN 832. [ONO98] Im Monatsverfahren dieser Norm können solare und interne Gewinne im Maße des Ausnutzungsgrades η den Heizwärmebedarf mindern. Durch den nicht nutzbaren Gewinnanteil $(1 - \eta)$ steigt die Raumtemperatur.

Als Kenngröße für die Überwärmung werden die normierten nicht nutzbaren Wärme-gewinne verwendet, die als Übertemperaturgradstunden interpretiert werden können. Diese errechnen sich aus der Summe der Monatswerte der nicht nutzbaren Wärme-gewinne bezogen auf den mittleren Wärmeverlustkoeffizienten:

$$Q_{NN} = \sum_{i=1}^{12} Q_{NN,i} = \sum_{i=1}^{12} \frac{(1 - \eta_i) \cdot Q_{G,i}}{H_i} \quad (4.)$$

Dabei bedeuten:

- Q_{NN} normierte nicht nutzbare Gewinne in Kh
- $Q_{NN,i}$ normierte nicht nutzbare Gewinne des Monats i in Kh
- η_i Ausnutzungsgrad des Monats i
- $Q_{G,i}$ Wärmegewinne des Monats i in Wh
- H_i mittlerer Wärmeverlustkoeffizient des Monate i in W/K

Der mittlere Wärmeverlustkoeffizient eines Monats errechnet sich aus dem Transmissionsleitwert H_T und dem Lüftungsleitwert $H_{L,i}$. Letzterer hängt von der an die Sommerverhältnisse angepassten Luftwechselzahl ab. Zur Berechnung der wirksamen Speicherkapazität, die den monatlichen Ausnutzungsgrades η bestimmt, muss aus Genauigkeitsgründen ÖNORM EN ISO 13786 [ONO00] verwendet werden.

Nach [KOL96] besteht eine Korrelation zwischen den normierten nicht nutzbaren Gewinnen und der Häufigkeit des Überschreitens der Grenztemperatur zur sommerlichen Überwärmung.

2.2.2.2 Überwärmung bei Wiener Klimabedingungen

Unter den Wiener Klimabedingungen von 1997 wurden Simulationen für leichte, gemischte und schwere Bauweisen vorgenommen, um die Überschreitung der Grenztemperatur zu bestimmen. Für die untersuchten Varianten wurden die jeweils zugehörigen normierten nicht nutzbaren Gewinne nach dem vorgestellten Verfahren ermittelt.

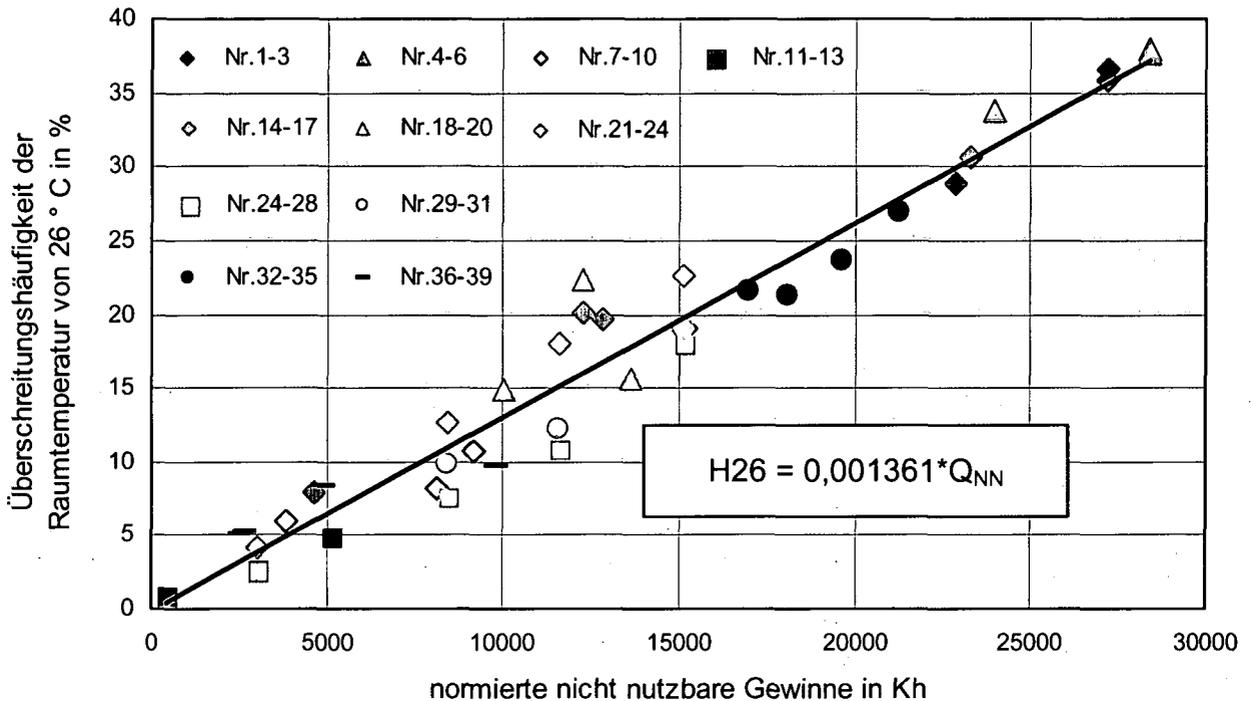
Als Grundlage für die Simulationsvarianten wurde das Modell von Kapitel 2.2.1 „Wärmeübertragung zwischen Zonen“ benutzt. In der folgenden Tabelle sind die davon abweichenden Spezifikationen der untersuchten Varianten, die Werte für die normierte nicht nutzbare Gewinne und die Überschreitungshäufigkeiten aufgelistet.

Nr.	Bauweise ¹⁾	Speicherkapazität in kJ/m ² K	Außenbauteil ²⁾	Fenstergröße		Luftwechsel		Sonstiges	QNN in Kh	H>26 °C in %
				Süd	Nord	7-19 Uhr	19-7 Uhr			
1	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	1	1		22892	28,90
2	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	1	1		27206	36,52
3	schwer	65571	S,O,N	9,5	4,2	1	1		27200	35,88
4	schwer	63998	B,W,N,O	9,5	4,2	1	1	nach O gedreht	23980	33,79
5	schwer	64311	W,N,O	9,5	4,2	1	1	nach O gedreht	28386	37,99
6	schwer	65571	W,N,O	9,5	4,2	1	1	nach O gedreht	28382	37,66
7	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	2	2		8111	8,16
8	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	1,5	1,5		15180	18,98
9	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	2	2		9190	10,75
10	schwer	65571	S,O,N	9,5	4,2	3	3		3819	5,90
11	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	2	2	Qi=0	5168	4,92
12	schwer	66320	S,O,N	3,8	4,2	2	2	Qi=0	3028	2,66
13	schwer	68284	S,O,N	1,9	4,2	3	3	Qi=0	419	0,95
14	gemischt	36751	B,S,O,N	9,5	4,2	1	1	Holzdecke, Betonwände	23307	30,67
15	leicht	22910	S,O,N,W	9,5	4,2	1,5	1,5		12279	20,07
16	leicht	23074	S,O,N,W	5,7	4,2	2	2		4674	7,90
17	gemischt	65128	S,O,N	9,5	4,2	1,5	1,5	Holzdecke, Betonwände	12849	19,67
18	gemischt	36751	B,S,O,N	9,5	4,2	1	2	Holzdecke, Betonwände	13638	15,66
19	leicht	22910	S,O,N	9,5	4,2	2	1		12279	22,32
20	gemischt	65128	S,O,N	9,5	4,2	1,75	1,75	Holzdecke, Betonwände	10019	14,87
21	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	2	0,5	Qi=0	11619	17,93
22	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	2	1		15153	22,53
23	schwer	66320	S,O,N	3,8	4,2	3	1		3028	4,10
24	schwer	68284	S,O,N	1,9	4,2	1	0,5		8429	12,68
25	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	0,5	2	Qi=0	11619	10,82
26	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	1	2		15153	18,06
27	schwer	66320	S,O,N	3,8	4,2	1	3		3028	2,45
28	schwer	68284	S,O,N	1,9	4,2	0,5	1		8429	7,65
29	schwer	63998	B,S,O,N	9,5	4,2	1,25	1,25	Qi=0	11619	12,21
30	schwer	64311	S,O,N	9,5	4,2	1,5	1,5		15153	18,98
31	schwer	68284	S,O,N	1,9	4,2	0,75	0,75		8429	9,81
32	schwer	64677	B,S,O,N	7,5	4,2	1	1		18087	21,26
33	schwer	65756	S,O,N	9,5	0,0	1	1		21282	26,99
34	schwer	65615	S,O,N	5,7	4,2	1	1		16981	21,51
35	schwer	65571	S,O,N	9,5	4,2	1	1	Qi=0	19623	23,63
36	gemischt	38759	B,S,O,N	3,8	4,2	1	1	Holzdecke, Betonwände	9773	9,66
37	leicht	22910	S,O,N,W	9,5	4,2	1,5	3	Qi=0	4888	8,28
38	leicht	23074	S,O,N,W	5,7	4,2	2	2	Qi=0	2521	5,08
39	leicht	23239	S,O,N,W	1,9	4,2	1,5	1,5		2532	5,23

¹⁾ schwere Bauweise: Wände, Decken aus Beton; leichte Bauweise: Wände, Decken aus Holz
²⁾ die angeführten Bauteile Süd-, Ost-, Nordwand und Boden grenzen an Außenklima

Tab. 20 Zusammenstellung der Varianten

Der Zusammenhang aus den normierte nicht nutzbare Gewinne Q_{NN} und der Überschreitungshäufigkeit der Raumlufttemperatur von 26 °C, abgekürzt mit H26, ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Tab. 21 H26 in Abhängigkeit von Q_{NN} für Wiener Klima

Der Zusammenhang zwischen den normierten nicht nutzbaren Gewinne Q_{NN} und der Überschreitungshäufigkeit H26 von 26°C bei den herrschenden Klimabedingungen in Wien wird mit der linearen Regressionsgerade $H26 = 0,001361 \cdot Q_{NN}$ charakterisiert.

Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wurden drei Klimaregionen mit 25 °C, 26 °C bzw. 27 °C als Grenzwert für die Raumtemperatur festgelegt, der an nicht mehr als 10 % der Aufenthaltszeit überschritten werden darf. [ROV00]

In Österreich wird entsprechen ÖNORM B 8110-3 sommerliche Überwärmung als vermieden betrachtet, wenn die empfundene Raumtemperatur am Tag 27 °C und in der Nacht 25 °C nicht überschreitet, wobei vielfach 26 °C als Grenze für den ganzen Tag verwendet wird.

Vergleichsberechnungen zwischen dem modifizierten Verfahren und ÖNORM B 8110-3 zeigen gute Übereinstimmung bei den Anforderungen hinsichtlich der Vermeidung von sommerlicher Überwärmung.

2.3 Gebäudemodell mit Buildopt

2.3.1 Kenngrößen

Das Programm Buildopt [BED02] ermöglicht das Erstellen eines Multizonenmodells eines Gebäudes. Folgende Punkte können mit dem Programm berechnet werden:

2.3.1.1 Verschattung

Aus den geometrischen Eingaben für das Gebäude und die Umgebung wird monatsweise für jeden transparenten Bauteil die tatsächliche Verschattungssituation ermittelt. Dazu werden alle transparenten Bauteile in einen Raster mit bis zu 15 mal 15 Punkten unterteilt. Das Verhältnis der unbesonnenen Rasterpunkte zu den gesamten Rasterpunkten ergibt den Verschattungsgrad. Die Verschattungsberechnung wird für jeden Monat an einem Tag in Monatsmitte durchgeführt.

2.3.1.2 Heizwärmebedarf

Im Modell können beheizte und unbeheizte Zonen berücksichtigt werden. Die Verluste von zweidimensionalen Wärmebrücken werden den Leitwerten der Bauteile hinzugerechnet. Die Ermittlung des erforderlichen Heizwärmebedarfes erfolgt nach ÖNORM EN 832. [ONO98] In den folgenden Berechnungen wurde das Wiener Klima des Jahres 1997 verwendet.

2.3.1.3 Heizlast

Die Heizlast von Passivhäusern muss unter 10 W/m^2 Wohnnutzfläche liegen, um die Zufuhr der benötigten Heizenergie über die Luft zu ermöglichen. [FEI00]

Die gültige Norm zur Ermittlung der Heizlast ist ÖNORM M 7500. [ONO83] Mit der statischen Berechnung nach dieser Norm wird die Heizlast für Passivhäuser überschätzt, da interne und solare Gewinne keine Berücksichtigung finden.

Die Wohnungen werden aufgrund von Erfahrung mit ausgeführten Bauten auf $22 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizt und fremdbeheizte Wohnungen werden im Gegensatz zur Normvorgabe von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Heizlastberechnung ebenfalls mit $22 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt. Eine Risikoanalyse, die diese Abweichung zur Norm rechtfertigt, ist in der Diplomarbeiten "Risk Assessment in Passivhaussystemen im sozialen Wohnbau" von Christoph Deseyve [DES02] erstellt am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik, TU Wien, enthalten.

In ÖNORM M 7500 wird die Norm-Außentemperatur festgelegt als der niedrigste Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur eines Ortes, der 10mal in 20 Jahren erreicht oder unterschritten wurde. In Wien beträgt die Norm-Außentemperatur -12°C . Um das einfache Normverfahren für Passivhäuser zu adaptieren, wurde die Außentemperatur modifiziert. Diese wurde aus dem Vergleich der Heizlastermittlung nach ÖNORM M 7500 und der des dynamischen Simulationsmodells von Kapitel 2.2.1 mit jeweils den gleichen Eingabewerten ermittelt.

In der folgenden Tabelle sind die Heizlasten in W der vier Zonen, berechnet mit dem Simulationsprogramm ESP-r und im Vergleich dazu mit nach ÖNORM M 7500, aufgelistet.

Geschoss	Heizlasten in W berechnet mit			
	ESP-r mit Wien 1997	ESP-r mit $t_{ne} = -12\text{ °C}$	ÖNORM M 7500 mit $t_{ne} = -12\text{ °C}$	ÖNORM M 7500 mit $t_{e,mod} = -6\text{ °C}$
EG	563	644	976	784
1.OG	393	449	597	471
2.OG	393	449	597	471
3.OG	553	632	886	710

Tab. 22 Heizlasten berechnet mit ESP-r und nach ÖNORM M 7500

Bei allen Berechnungen wurden interne Gewinne von $1,6\text{ W/m}^2$ berücksichtigt sind. [FEI00] In der Spalte „ESP-r mit Wien 1997“ sind die Ergebnisse der Heizlast des Simulationsmodells von Kapitel 2.2.1 der Variante mit durchschnittlichem Fensteranteil und mit zentraler Lüftungsanlage für das Klima Wien 1997 dargestellt. Der niedrigste Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur von Wien 1997 ist $-7,76\text{ °C}$. Die Zweitagesmitteltemperatur von Wien 1997 wurde auf die Auslegungstemperatur von -12 °C skaliert, wodurch sich die Heizlasten in der Spalte „ESP-r mit $t_e = -12\text{ °C}$ “ ergeben.

In der nächsten Spalte sind diese Heizlasten nach dem Normrechenverfahren der ÖNORM M 7500 dargestellt, wobei fremdbeheizte Wohnungen mit 22 °C in die Berechnung eingehen. In der letzten Spalte befinden sich die Heizlasten, die dem einer modifizierten Außentemperatur $t_{e,mod}$ von -6 °C berechnet wurden. Die Heizlasten für alle Geschosse liegen über den Werten der dynamischen Simulation skaliert auf die Norm-Außentemperatur und damit auf der sicheren Seite.

2.3.1.4 Sommerverhalten

Die Übertemperaturgradstunden werden nach dem unter Punkt 2.2.2 vorgestellten Verfahren berechnet.

2.3.1.5 Variationen

Das Programm ermöglicht die Variation der Eingabeparameter für die Dämmstärken der Konstruktionen, die Fenstergrößen, die Fenstertypen und die Größe der Verschattungselemente. Mit den einfachen Berechnungsmethoden soll mit verhältnismäßig geringem Rechenaufwand das bauphysikalische Verhalten unterschiedlicher Konfigurationen eines Gebäudes berechnet und verglichen werden.

2.3.2 Optimierung

2.3.2.1 Einleitung

Mit dem im Folgenden vorgestellten Verfahren werden die mit dem Programm Buildopt berechneten Größen für den Heizwärmebedarf, die Heizlast, das Somerverhalten und die Kosten miteinander zur bauphysikalischen Performance verknüpft.

Die Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf die bauphysikalische Performance werden systematisch analysiert. Somit kann die für den jeweiligen Fall optimale Dimensionierung vorgenommen werden. Ziel dieses einfachen Verfahrens ist, dem Planer im Designprozess bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

2.3.2.2 Bewertungskriterien

Um die unterschiedlichen Variationen des Gebäudes miteinander vergleichbar zu machen, werden verschiedene Bewertungskriterien zu einer Funktion zusammengefasst. In einem Punktesystem werden die Kosten, den Heizwärmebedarf, die Heizlast und das Somerverhalten bewertet.

Wird ein Kriterium nicht erfüllt, wird mit 0 bewertet, deutet das auf die Untauglichkeit dieser Variation hin und hat deren Ausscheiden zur Folge.

2.3.2.2.1 Kosten

Investitionskosten

Die Investitionskostenunterschiede werden für die Variationen berechnet. Dazu werden übliche Baustoff- und Herstellungskosten verwendet.

Energiekosten

Die Energiekostenunterschiede werden mit der Barwertmethode hochgerechnet. Es wird der reale inflationsbereinigte Zinssatz verwendet:

$$p_{\text{real}} = \frac{1 + p_{\text{nominal}}}{1 + i} - 1 \quad (5.)$$

Dabei bedeuten:

p_{real}	realer Zinssatz
p_{nominal}	nominaler Zinssatz
i	Inflationsrate

Der Barwert von jährlich anfallenden Kosten ergibt sich aus den jährlichen Kosten, die in der Berechnung konstant angesetzt werden, multipliziert mit dem Barwertfaktor. Dieser ergibt sich aus:

$$\sum_{m=1}^n (1 + p_{\text{real}})^{-m} = (1 - (1 + p_{\text{real}})^{-n}) / p_{\text{real}} \quad (6.)$$

Dabei bedeuten:

$\sum_{m=1}^n (1 + p_{\text{real}})^{-m}$	Barwertfaktor
m	Laufvariable für die Jahre
n	Betrachtungszeitraum

Der Kostenberechnung sind ein Betrachtungszeitraum von 30 Jahren und ein realer Zinssatz von 4 % p.a. zugrunde gelegt. Daraus ergibt sich ein Barwertfaktor von 17,29.

Bewertung

Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, wird die Variante mit minimalen Kosten mit einem Bewertungspunkt bewertet, die mit maximalen Kosten mit 0 Punkten und dazwischen linear verteilt.

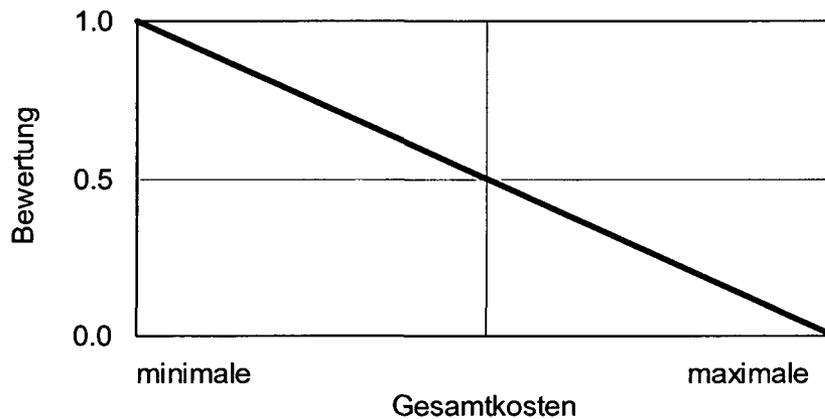


Abb. 11 Bewertungsfunktion für die Gesamtkosten

2.3.2.2.2 Heizwärmebedarf

Die zulässige Grenze für den mittleren Heizwärmebedarf eines Gebäudes ist 15 kWh/m² Wohnnutzfläche. Unter dieser Grenze wird ein Bewertungspunkt vergeben, die Varianten über dieser Grenze werden ausgeschieden.

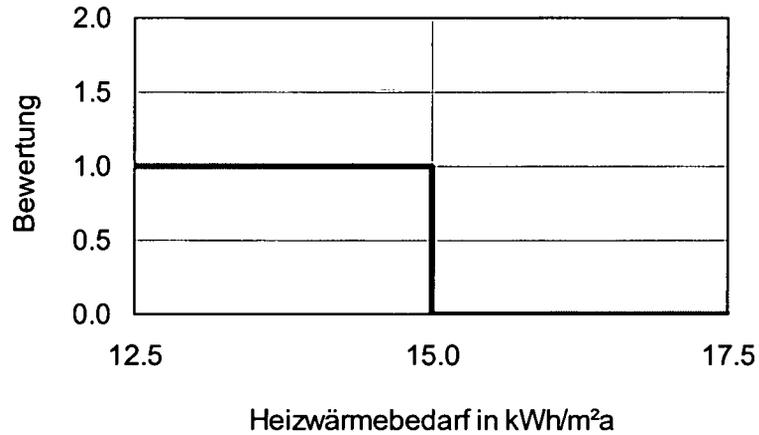


Abb. 12 Bewertungsfunktion für den Heizwärmebedarf

2.3.2.2.3 Heizlast

Die Gebäudeheizlast ist mit 10 W/m² Wohnnutzfläche begrenzt. Diese Grenze ist wegen der vorgesehenen Luftnachheizung in jeder Wohnung einzuhalten. Die Heizlasten über 10 W/m² sind mit keinem und darunter mit einem Bewertungspunkt beurteilt.

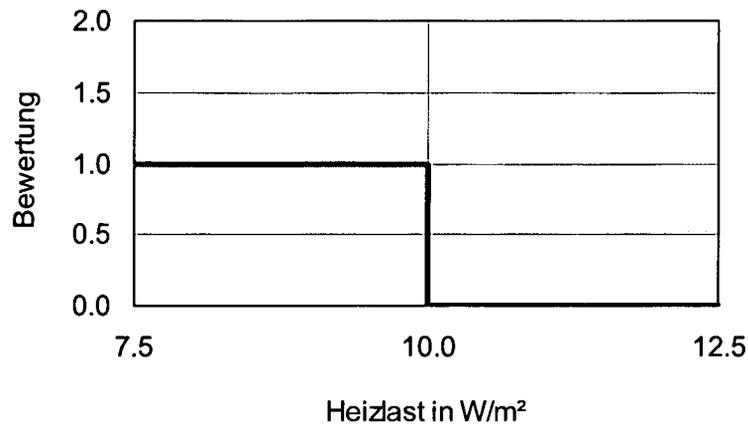


Abb. 13 Bewertungsfunktion für die Heizlast

2.3.2.2.4 Sommerverhalten

Die Überschreitungshäufigkeit von 26 °C ist mit 0 % der Zeit je Wohnung begrenzt, das heißt 26 °C dürfen nicht überschritten werden. Das Sommerverhalten wird unter 0 % Überschreitungsgradstunden mit 1 bewertet. Über der zulässigen Grenze von 0 % wird mit Null gewertet.

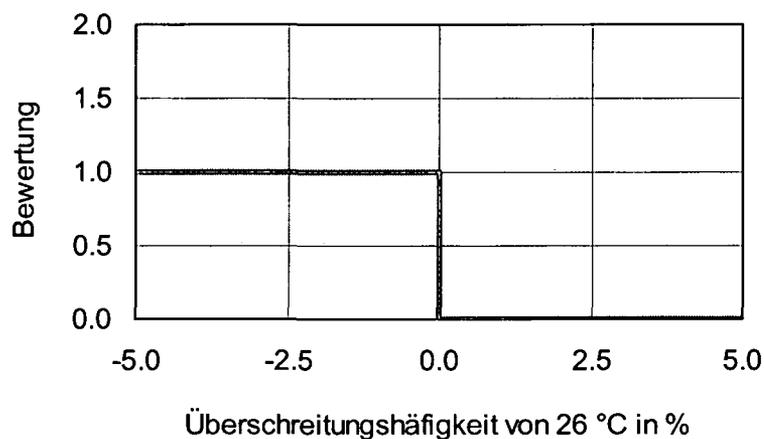


Abb. 14 Bewertungsfunktion für das Sommerverhalten

2.3.2.3 Optimierte Performance

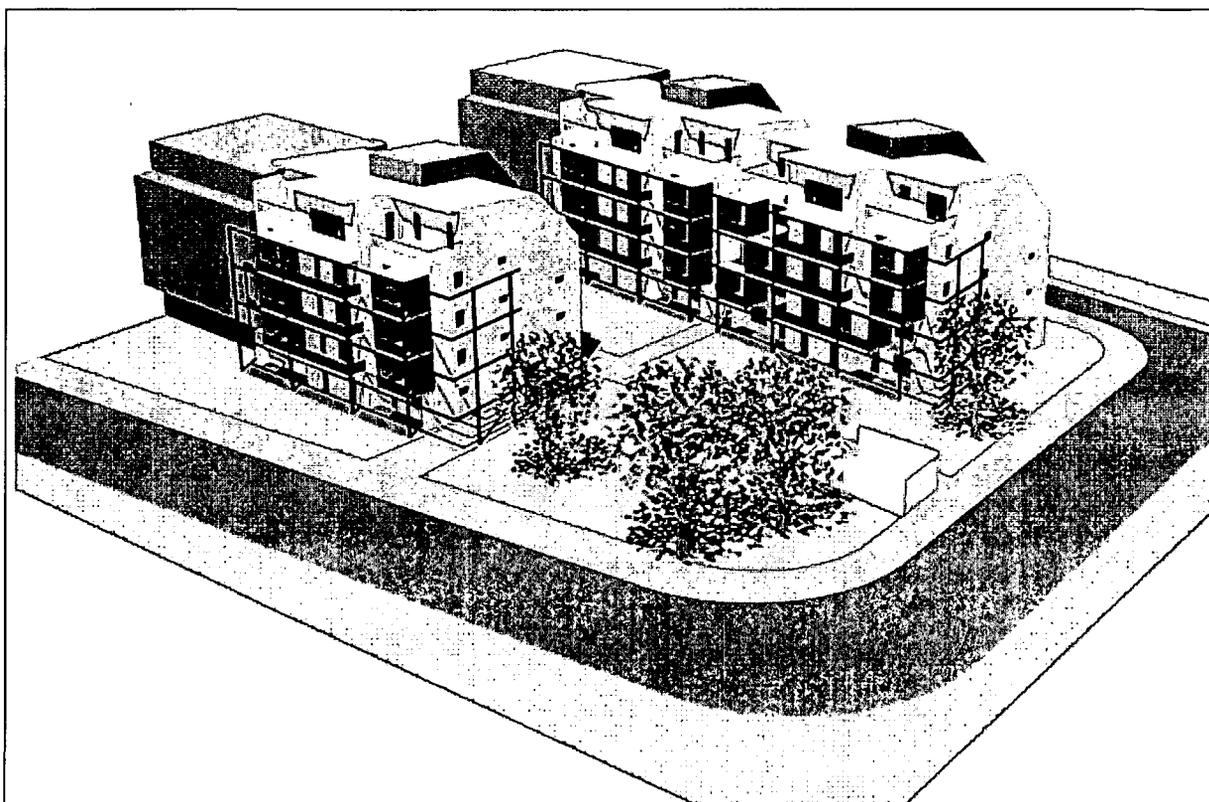
Für jede Ausführungsvarianten werden die Bewertungen der einzelnen Kriterien summiert, wobei die untauglichen Varianten ausgeschieden werden. Die Konfiguration mit dem bauphysikalischen Performanceoptimum weist die größte Bewertungspunktezahl auf.

2.4 Optimierung der bauphysikalischen Performance

2.4.1 Passivhaus Utendorfgasse

Das Passivhaus Utendorfgasse in Wien für den mehrgeschossigen Wohnbau, das im Projekt „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau“ [ANW03] bearbeitet wurde, bildet die Grundlage der in Kapitel 3 und 4 dargestellten Beispiele.

Das Projekt wurde im Rahmen des Impulsprogramms „Haus der Zukunft“, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.



Passivwohnbau 1014 Wien, Utendorfgasse 7
38 Wohneinheiten mit Tiefgarage, 3 Lifte, Loggien und Mietergärten

Bauträger: Heimat Österreich
Generalplanung: Schöberl & Pöll OEG, Wien
Architektur: Arch. Kuzmich, Wien
Bauphysik: Inst. Bauphysik, TU Wien
Haus- und Elektrotech.: TB DI Steininger, Wien
Tragwerksplanung: Werkraum ZT OEG, Wien

Abb. 15 Gebäudekonzept des Projekts „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau“ [ANW03]

Das Gebäude ist in drei Einzelhäuser unterteilt, die im folgenden Grundriss der Regelgeschosse dargestellt sind. [ANW03]

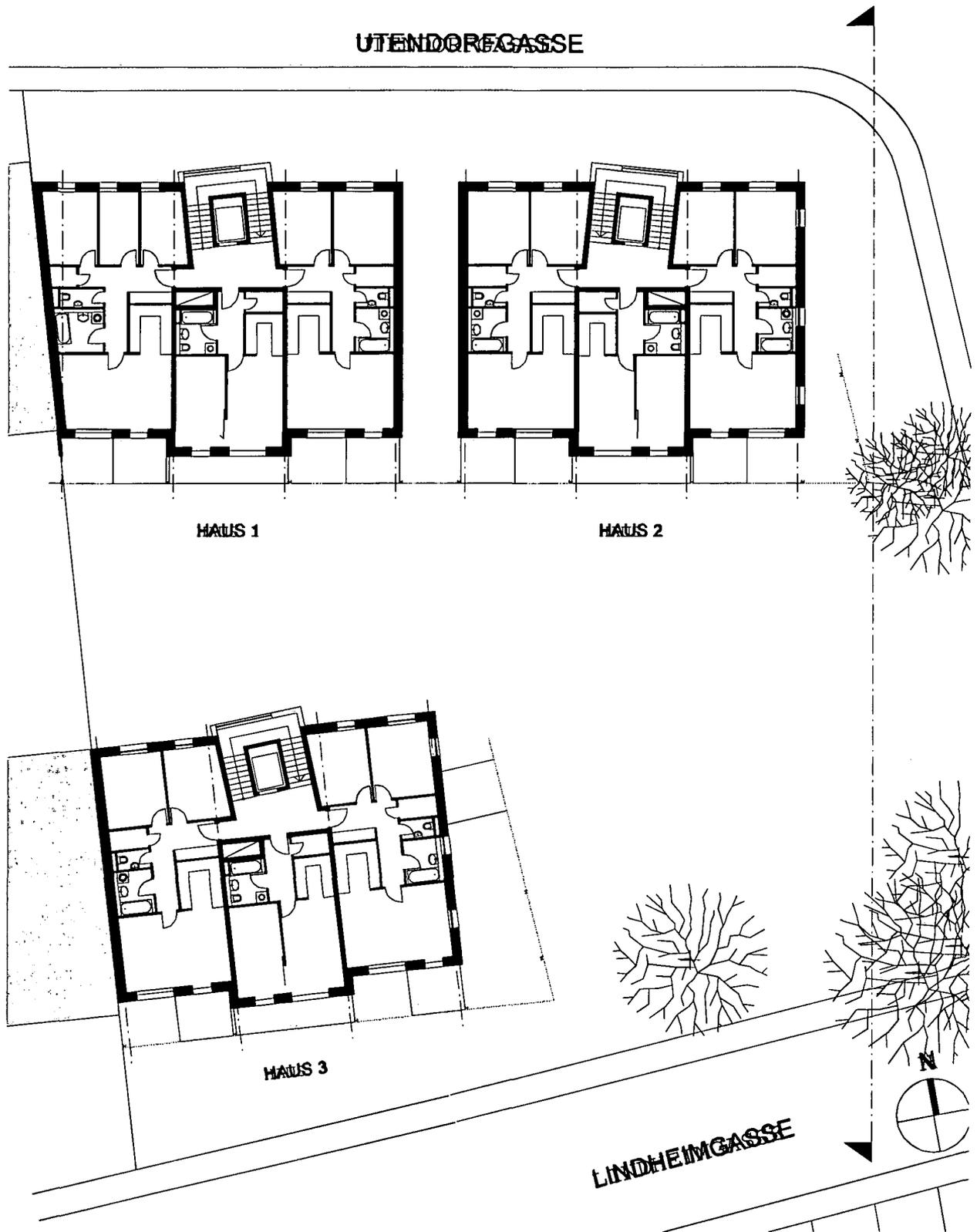


Abb. 16 Grundriss des Projekts „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau Regelgeschosse“ [ANW03]

Für die weiteren Berechnungen wird Haus 2 mit einer Bruttogeschossfläche von 1358,01 m² und einer Wohnnutzfläche von 883,29 m² verwendet. [ANW03]

2.4.2 Eingaben in Buildopt

2.4.2.1 Geometrie

Die geometrischen Eingaben basieren auf den architektonischen Vorgaben.

In der folgenden Abbildung ist ein Drahtgittermodell der geometrischen Eingaben und der Verschattungselemente von Haus 2 inklusive einem Teil der Tiefgarage dargestellt.

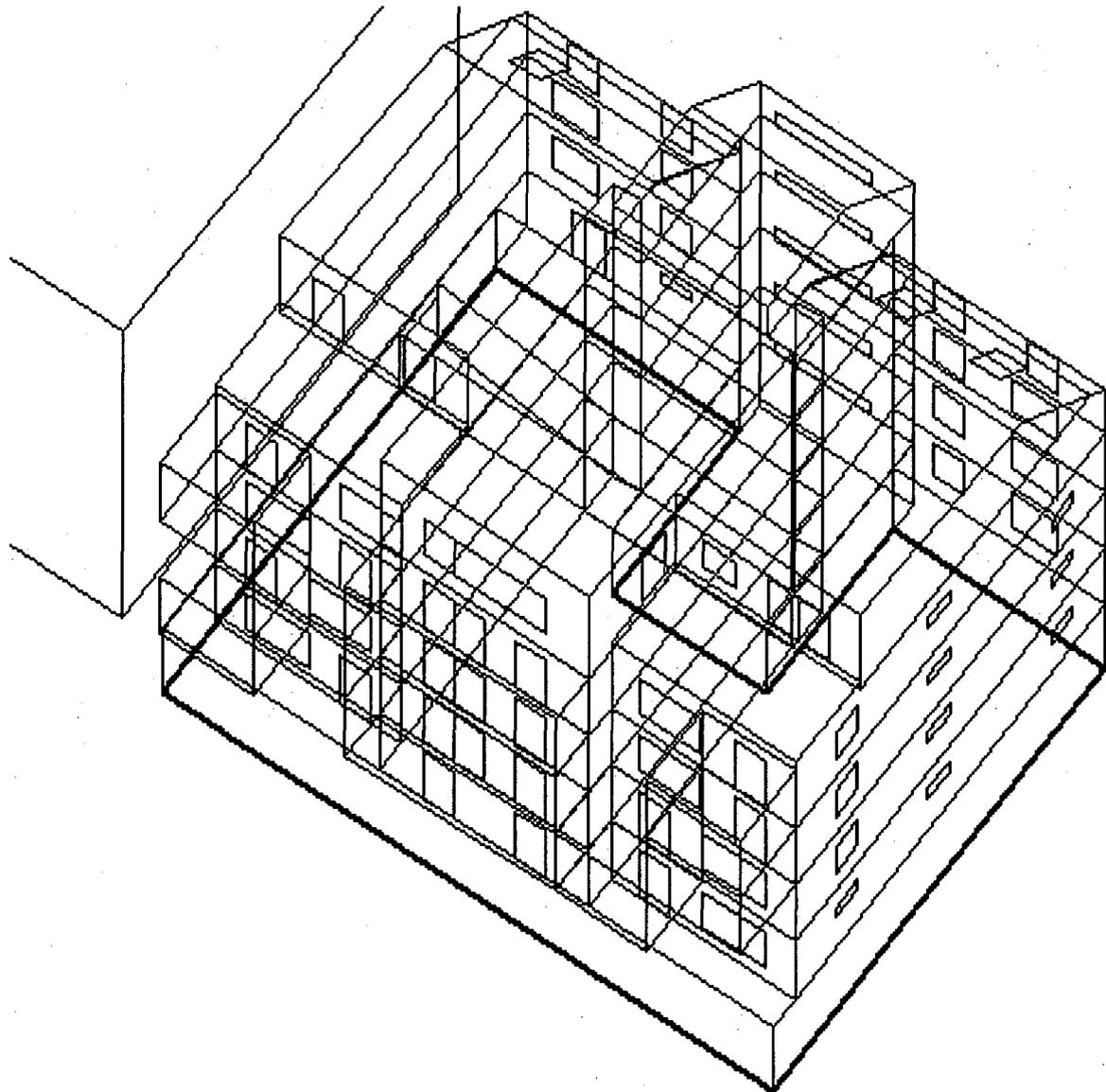


Abb. 17 Drahtgittermodell von Haus 2 erstellt mit Buildopt [BED02]

Im Drahtgittermodell sind die Zonen aus schwarz gezeichneten Begrenzungsflächen aufgebaut. Transparente Bauteile sind rot und Verschattungsflächen blau dargestellt.

2.4.2.2 Verschattung

Haus 2 ist durch die südseitig angeordneten Loggien und die Nachbargebäude verschattet. Diese Verschattungsflächen sind im Drahtgittermodell blau dargestellt. Entsprechend den architektonischen Vorgaben kragen in die mittleren Wohnungen des 1., 2. und 3. Obergeschosses die Loggienfußböden, die Seitenwände und die Loggiendecken 1,50 m aus. In den anderen Wohnungen im 1., 2., und 3. Obergeschoss sind jeweils vor den Balkontüren Loggien mit einer Kraglänge von 2,50 m vorgesehen.

Es ist keine Verschattung durch Bewuchs berücksichtigt und der Höhenwinkel des Horizontes wurde mit 10° festgelegt.

2.4.2.3 Konstruktionsaufbauten

Das Gebäudemodell wurde im Programm Buildopt aus folgenden Konstruktionen aufgebaut:

Konstruktion	thermisch relevante Schichten	Dicke in cm	U-Wert in W^2K
Außenwand	Dünnputz	1	0,129
	Wärmedämmung ($\lambda = 0,04 W/mK$)	30	
	Stahlbeton	20	
Oberste Geschossdecke	Dachhaut	-	0,098
	Z-Pfetten u. Wärmedämmung	45	
	Stahlbeton	18	
Decke unter Dachterrassen	Plattenbelag u. Abdichtung	7	0,129
	Wärmedämmung ($\lambda = 0,04 W/mK$)	30	
	Stahlbeton	20	
Wohnungstrenndecke	Parkett, Estrich	7	0,900
	Trittschalldämmung ($\lambda = 0,04 W/mK$)	3	
	Sandausgleich u. Stahlbeton	20	
Wohnungstrennwand und Stiegenhaustrennwand	Gipskartonplatte	1,5	0,623
	Wärmedämmung ($\lambda = 0,04 W/mK$)	5	
	Stahlbeton	20	
Decke zur Tiefgarage	Estrich, Bodenbelag	12	0,124
	Wärmedämmung ($\lambda = 0,04 W/mK$)	35	
	Stahlbeton	20	
Tiefgaragenwand- und decke gegen Erdreich	Stahlbeton	30	3,660
Tiefgaragendecke gegen Außenluft	XPS ($\lambda = 0,035 W/mK$)	5	0,660
	Stahlbeton	30	

Tab. 23 **Aufbauten des Gebäudemodells**

2.4.2.4 Wärmebrücken

Die linearen Wärmebrückenbeiwerte in W/m wurden im Rahmen des Projekts [ANW03] berechnet und sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Wärmebrücke	Wärmebrückenbeiwerte in W/m
Innenkante der Außenwand	-0,108
Außenkante der Außenwand	-0,052
Brüstung, Sturz	0,078
Laibung	0,064
Porenbetonaufleger	0,033

Tab. 24 Wärmebrückenbeiwerte

Für die Berechnung des Porenbetonauflegers wurden unter allen tragenden Wänden Porenbetonsteine mit einer Höhe von 40 cm angesetzt.

2.4.2.5 Fenster und Türen

Das verwendete Kunststofffenster weist das von der Bauordnung für Wien [BOW03] geforderte Schalldämmmaß von 38 dB auf. Die Verglasung hat einen U-Wert von $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf, wobei $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ als Sicherheitszuschlag für eventuellen Gasverlust etc. berücksichtigt wurde. Der Gesamtenergiedurchlassgrad beträgt bei 0,42. Der Rahmen hat einen U-Wert von $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ und ist innen ca. 11 cm breit. Der Ψ -Wert des Randverbundes ist $0,053 \text{ W/Km}$. Die Wärmebrückenbeiwerte für die Brüstung und den Sturz ergeben mit $0,078 \text{ W/Km}$. Die Laibung wurde ohne Anschlusswinkel angesetzt, was einem Beiwert von $0,064 \text{ W/mK}$ entspricht.

Die Dachflächenfenster „VELUX GGL –64“ der Firma Velux haben Wärmedurchgangskoeffizienten U_F von $0,91 \text{ W/m}^2\text{K}$ und eine g-Wert von 0,52. [VEL01]

Die Spezifikationen des Türfabrikats „RIWAG ISOTHERM 75“ der Firma Rickenbach + Wiget AG [RIK02] bilden die Grundlage für die verwendeten Türen. Der gesamte U-Wert für die Türen wird mit $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt. Der Wärmebrückenbeiwerte der Türen werden analog zu den der Fenster gewählt.

In der folgenden Tabelle sind die Orientierungen und Abmessungen der in Haus 2 eingebauten Fenster und Türen angeführt.

Geschoss	Anzahl	Ausrichtung nach bzw. Beschreibung	Architekturlichte in cm	
			Breite	Höhe
Erdgeschoss	4	Süden	100	230
	2	Süden	200	170
	1	Norden	100	50
	1	Norden	150	160
	1	Norden	100	160
1. bis 3.Obergeschoss	6	Süden	200	170
	15	Süden	100	230
	3	Osten	100	130
	5	Osten	100	65
	4	Norden	150	160
	8	Norden	100	160
Dachgeschoss	4	Süden	100	210
	1	Süden	125	110
	1	Süden	300	170
	1	Süden	100	170
	1	Osten	100	210
	3	DFF nach Norden ¹⁾	100	185
Stiegenhaus und Eingang	5	Norden	250	60
	5	Norden	55	60
Türen	1	Eingang	160	220
	3	Tiefgarage	90	220
	1	Fahrradraum	100	220

¹⁾ Dachflächenfenster in einer Dachfläche nach Norden

Tab. 25 Fenster und Türen im Haus 2

Die Verschattung wird nach den jeweiligen Sommergehältnissen in den Wohnungen gewählt. Innenliegende Verschattungen sind mit einem Verschattungsgrad von 0,85 angesetzt und außenliegende mit 0,25.

2.4.2.6 Sonstiges

Für die Heizperiode wurden der Luftwechsel mit $0,4 \text{ h}^{-1}$ und der Wärmerückgewinnungsgrad mit 0,8 festgelegt. Der Infiltrationsluftwechsel wurde mit $0,02 \text{ h}^{-1}$ abgeschätzt, somit ergibt sich ein energetisch wirksamer Luftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$. Der notwendige Luftwechsel im Eingangsbereich, im Stiegenhaus und im Fahrradabstellraum beträgt $0,1 \text{ h}^{-1}$. Der Luftwechsel im Sommer ist in allen Zonen mit $1,5 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. In der Tiefgarage ist ein Frischluftvolumen von $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ notwendig, was einem Luftwechsel von $0,64 \text{ h}^{-1}$ entspricht.

Die Innentemperatur in den Wohnräumen ist mit 22 °C angesetzt. Die inneren Lasten wurden mit $2,1 \text{ W/m}^2$ für die Berechnung des Heizwärmebedarfes und mit $1,6 \text{ W/m}^2$ für die Berechnung der Heizlast gewählt. [FEI00]

Die Stiegenhäuser, der Windfang und der Fahrradraum sind unbeheizt. Für die Berechnung wurde das Klima des Jahres 1997 von Wien verwendet. Die Erdreichtemperatur wurde konstant mit 5 °C angesetzt.

2.4.3 Optimierung

Aus der systematischen Variation verschiedener Eingangsparameter des Gebäude-modells soll eine bauphysikalisch und kostenmäßig optimierte Konfiguration gefunden werden.

Die Optimierung der bauphysikalischen Performance wird für die Dicke der Außenwanddämmung, für den Fenstertyp und die Fenstergröße vorgenommen.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse ergeben sich aus dem zweiten Iterationsschritt, bei dem die Ergebnisse des ersten für die anderen veränderlichen Parameter angesetzt wurden. Für die Dämmstärke der untersten und der obersten Geschoßdecke wurden Erfahrungswerte aus gebauten Passivhäusern angesetzt.

2.4.3.1 Außenwanddämmung

Die Dämmstoffstärke des Wärmedämmverbundsystems wird variiert. Für die Berechnung bleiben die Verklebung, der Deckputz und sonstige Randbedingungen unverändert. Die Variation der Dämmstoffdicke findet in Schritten von 5 cm statt.

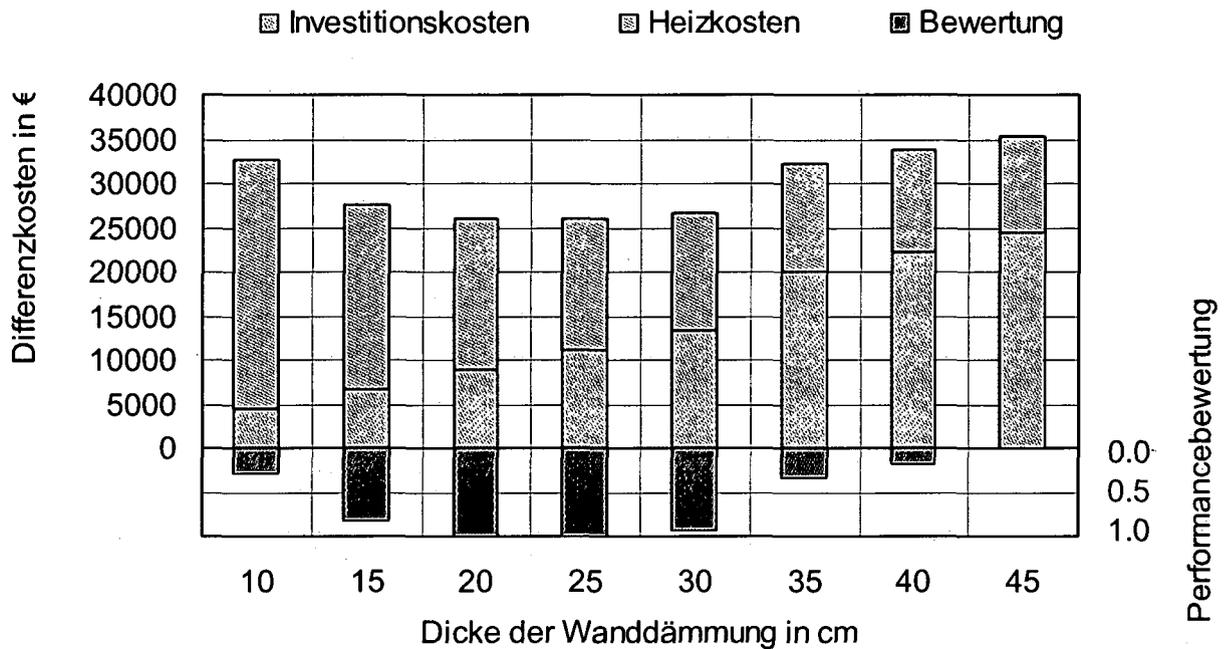
Die untere Grenze der Wanddämmstärke von 7,5 cm wird durch die Wiener Bauordnung [BOW02] vorgegeben, die einen U-Wert von kleiner als 0,5 W/m²K fordert. Die maximale Dicke der Wanddämmung wird durch die Wirtschaftlichkeit begrenzt. Auf eine Verdübelung des Wärmedämmverbundsystems kann bis zu einer Stärke von 30 cm verzichtet werden. [ANW03] Ab einer Dicke von 35 cm sind 6,5 €/m² für die Verdübelung berücksichtigt.

Für die Optimierung der Außenwanddämmstärke wurden der Fenstertyp 3 und eine Süd- und Ostfenstergröße von 97 m² verwendet.

2.4.3.1.1 Differenzkosten

Für die Wanddämmung werden Investitionskosten von 0,65 €/m² und cm angesetzt. Für die Beheizung mit Gas werden Kosten in der Höhe von 0,06 €/kWh angesetzt.

In der folgenden Abbildung sind für verschiedene Wanddämmstärken die Differenzkosten für die Investition und die Kosten für die Beheizung dargestellt. Im unteren Bereich ist die Performancebewertung der Gesamtdifferenzkosten, die sich aus Investitions- und Betriebskosten ergeben, dargestellt.



Dämmstärke	Investitions- kosten in €	Heiz- kosten in €	Gesamt- kosten in €	Performance- bewertung
10	4461	28179	32640	0,29
15	6691	20847	27538	0,83
20	8921	17080	26001	1,00
25	11152	14807	25958	1,00
30	13382	13301	26683	0,92
35	20073	12236	32308	0,33
40	22303	11445	33748	0,17
45	24533	10836	35370	0,00

Abb. 18 Differenzkosten und Performancebewertung der Außenwandvariationen

Das kostenmäßige Minimum stellt sich bei einer Dämmstärke von 25 cm ein. Da die Funktion der Gesamtdifferenzkosten im Bereich des Optimums flach ist, ergibt sich ein optimaler Bereich zwischen 20 und 30 cm. Bei einer Wanddämmstärke von 35 cm steigen die Investitionskosten wegen der notwendigen Verdübelung überproportional an, was sich in der Performancebewertung für die Differenzkosten bemerkbar macht.

2.4.3.1.2 HWB, Heizlast und Somerverhalten

In der folgenden Tabelle sind die Heizwärmebedarfswerte (HWB), die Heizlasten jeweils bezogen auf die Wohnnutzfläche und die Performancebewertungen der unterschiedlichen Wanddämmstärken dargestellt.

Dämmstärke	HWB in kWh/m ² a	Performancebewertung HWB	Heizlast im W/m ²	Performancebewertung Heizlast
10	30,75	0,00	14,39	0,00
15	22,75	0,00	11,85	0,00
20	18,64	0,00	10,51	0,00
25	16,16	0,00	9,68	1,00
30	14,52	1,00	9,13	1,00
35	13,35	1,00	8,72	1,00
40	12,49	1,00	8,41	1,00
45	11,82	1,00	8,17	1,00

Tab. 26 Heizwärmebedarfswerte, Heizlasten und Bewertungen

Für das Einhalten des maximal zulässigen Heizwärmebedarfs sind 30 cm und zum Einhalten der maximal zulässigen Heizlast 25 cm Dämmstoff notwendig.

Das Somerverhalten wird von der Dämmstoffstärke an der Außenwand nur unwesentlich beeinflusst und ist aufgrund der sonstigen Konfiguration bei allen Varianten erfüllt.

2.4.3.1.3 Performanceoptimum

In der folgenden Abbildung sind die Performancebewertungen der unterschiedlichen Wanddämmstärken dargestellt.

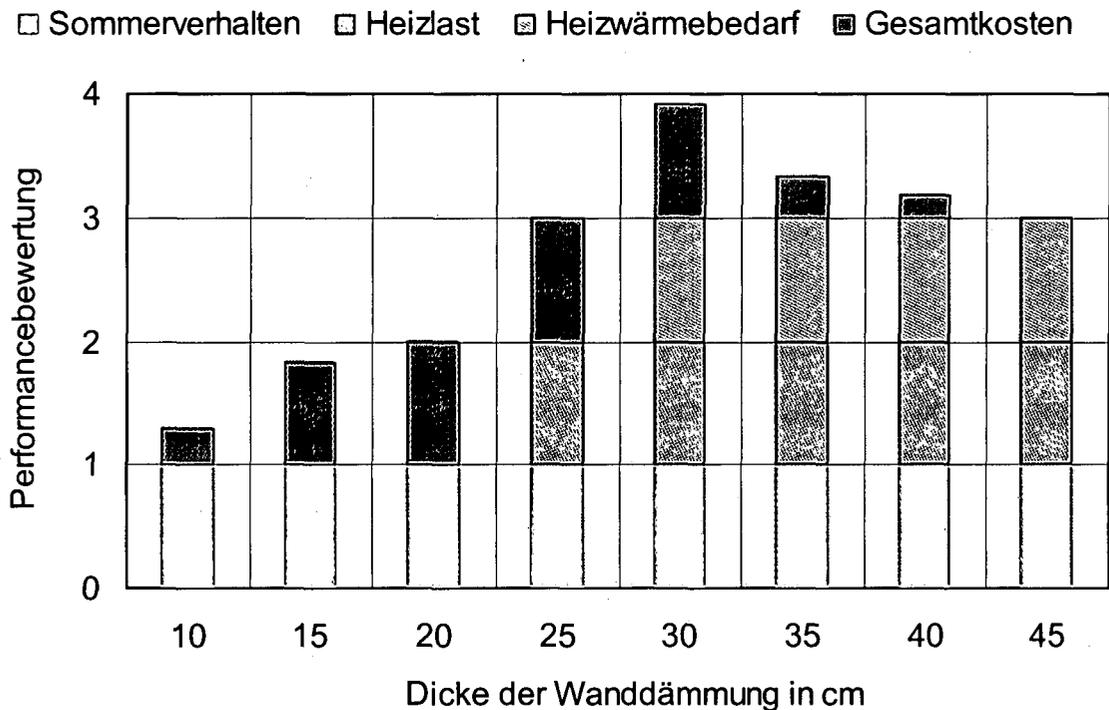


Abb. 19 Performancebewertung der Dämmstärken

Das Performanceoptimum der Wanddämmstärke liegt bei 30 cm. Die Varianten mit geringeren Dämmstärken erfüllen die Kriterien für den HWB und bzw. oder die Heizlast nicht. Die Varianten mit größeren Dämmstärken sind aufgrund der höheren Investitionskosten, insbesondere wegen der Verdübelung, im Nachteil.

2.4.3.2 Fenstertypen

Für die Optimierung der Fenstertypen standen für das Passivhaus drei Fenster zu Auswahl. Die beiden ersten Fenster sind passivhauszertifiziert, das dritte ist ein kostengünstiges Fenster mit guter Verglasung und handelsüblichem Kunststoffrahmen.

Die Preisermittlung der Fenster und die Berechnung der Wärmebrückenbeiwerte fanden im Rahmen des Projekts [ANW03] statt.

In der folgenden Tabelle sind die Eingabewerte dieser Fenstertypen aufgelistet.

Fenster	U_g in W/m^2K	U_f in W/m^2K	Rahmenbreite in cm	g-Wert	Ψ -Randverbund	Ψ -Einbau	Preis in €/m ²
Holzalu- fenster F1	0,70	0,73	11,4	0,48	0,038	0,064 0,057	330
Kunststoff- fenster F2	0,60	0,71	13,8	0,49	0,035	0,062 0,057	350
Kunststoff- fenster F3	0,60	1,30	11,4	0,42	0,053	0,078 0,064	250

Tab. 27 Eingabewerte für die Optimierung der Fenster

Der erste Wert in der Spalte für den Wärmebrückenbeiwert des Einbaus bezieht sich auf die Laibung, wo die Befestigung mit einem Stahlwinkel vorgenommen wird, und der zweite auf Sturz bzw. Brüstung. Die Beiwerte wurden für eine Dämmstärke von 30 cm berechnet. Das Luftschalldämmmaß aller Fenstertypen ist 38 dB, um der Bauordnung für Wien zu genügen. [BOW03]

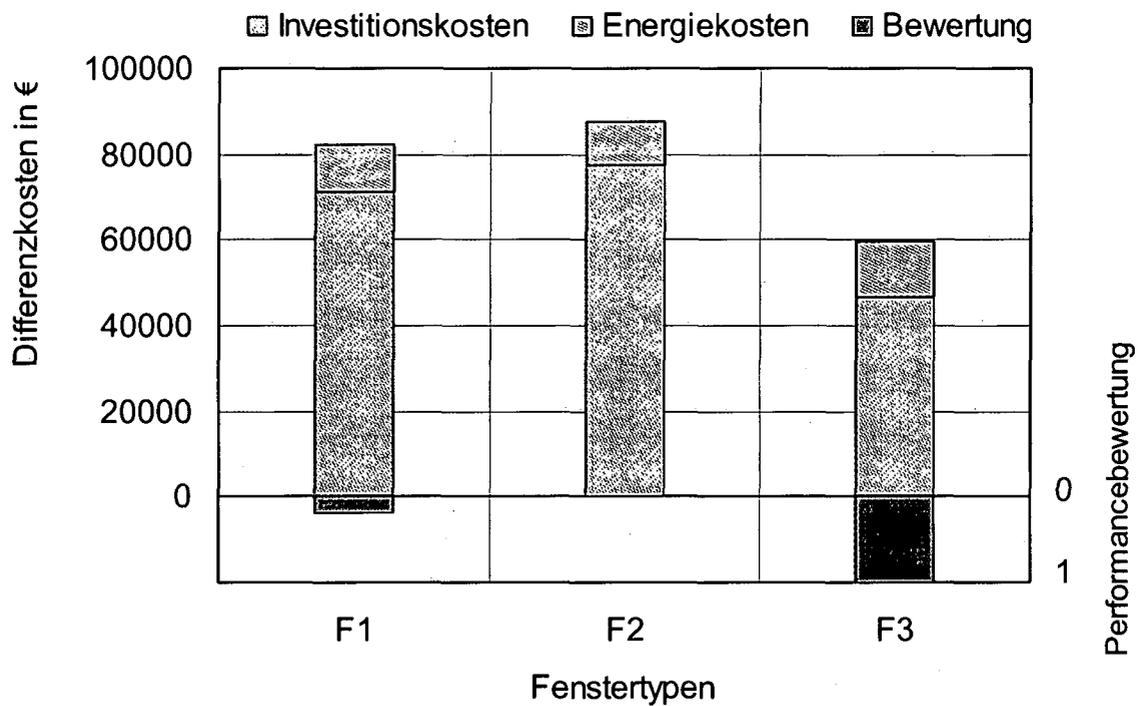
Für die Optimierung der Fenstertypen wurden eine Wanddämmstärke von 30 cm und eine Süd- und Ostfenstergröße von 97 m² verwendet.

2.4.3.2.1 Differenzkosten

Die Kostenunterschiede ergeben sich aus den Anschaffungs- und Heizkosten, die von den unterschiedlichen Fenstertypen verursacht werden. Die Kosten für einen passivhaustauglichen Einbau sind für alle Varianten gleich.

Es werden die Investitionskosten aus der vorstehenden Tabelle verwendet und für die Beheizung sind Kosten in der Höhe von 0,06 €/kWh angesetzt.

In der folgenden Abbildung sind die Differenzkosten für die Investition und die Kosten für die Beheizung der unterschiedlichen Fenstertypen dargestellt. Im unteren Diagrammabschnitt ist die Performancebewertung der Gesamtdifferenzkosten der Fenster dargestellt.



Fenstertyp	Investitions- kosten in €	Heizkosten in €	Gesamt- kosten in €	Performance- bewertung
F1	71329	10814	82142	0,19
F2	77531	10031	87563	0,00
F3	46519	12922	59441	1,00

Abb. 20 Differenzkosten und Performancebewertung der Fenstertypen

Das kostenmäßige Minimum stellt sich bei Fenstertyp F3 ein.

2.4.3.2.2 HWB, Heizlast und Sommergehalten

In der folgenden Tabelle sind die Heizwärmebedarfswerte (HWB), die Heizlasten jeweils bezogen auf die Wohnnutzfläche und die Performancebewertungen der unterschiedlichen Fenstertypen dargestellt.

Fenstertyp	HWB in kWh/m ² a	Performance- bewertung HWB	Heizlast im W/m ²	Performance- bewertung Heizlast
F1	12,24	1,00	8,62	1,00
F2	11,36	1,00	8,32	1,00
F3	14,52	1,00	9,13	1,00

Tab. 28 Heizwärmebedarfswerte, Heizlasten und Bewertungen

Mit allen Fenstertypen werden die Kriterien für den Heizwärmebedarf und die Heizlast eingehalten.

Da die untersuchten Fenstertypen ähnliche Gesamtenergiedurchgangszahlen und Glasflächen aufweisen, ergeben sich auch ähnliche solare Gewinne in den Räumlichkeiten. Zum Einhalten der Behaglichkeitsgrenze sind jeweils die gleichen Verschattungsmaßnahmen (siehe Punkt 2.4.4.3) erforderlich. Somit ergibt sich zwischen den drei Fenstertypen kein Unterschied bei den Investitionskosten für die Verschattung.

2.4.3.2.3 Performanceoptimum

In der folgenden Abbildung sind die Performancebewertungen der Fenstertypen dargestellt.

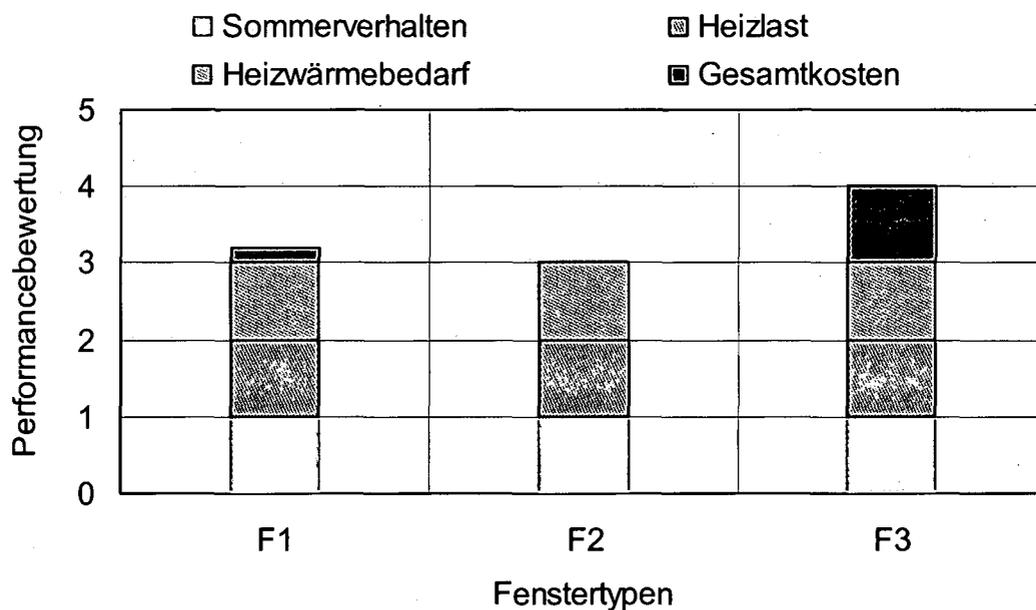


Abb. 21 Performancebewertung der Fenstertypen

Die Gesamtpformance ist vom Sommerverhalten, der Heizlast und vom Heizwärmebedarf unabhängig, da diese Kriterien von allen drei Fenstertypen erfüllt werden. Das Kunststofffenster F3 mit den niedrigsten Investitionskosten liegt in der Bewertung am günstigsten. Bei den anderen Fenstern kann die Betriebskostensparnis die höheren Investitionskosten in der angesetzten Lebensdauer von 30 Jahren nicht wettmachen.

2.4.3.3 Fenstergröße

Die süd- und ostorientierten Fenster werden in ihrer Größe variiert, um den Fensteranteil mit der maximalen bauphysikalischen Performance zu ermitteln. Die nordseitigen Fenster mit einer Fläche von ca. 54 m² bleiben in ihrer Größe unverändert. Für die Optimierung wird eine minimale Fensterfläche an der Süd- und Ostfassade von ca. 48 m² angesetzt, womit sich ein Fensteranteil von ca. 12% der Wohnnutzfläche von 883,29 m² ergibt. Die maximale Fensterfläche an der Süd- und

Ostfassade beträgt ca. 194 m², was einen Fensteranteil von ca. 28 % der Wohnnutzfläche bedeutet.

Die Wiener Bauordnung fordert für Aufenthaltsräume eine Fensterfläche von 10 % der Fußbodenfläche. Diese Grenze wird durch den angesetzten minimalen Fensteranteil eingehalten. Der maximale Fensteranteil wird durch die maximale Heizlast, die Wirtschaftlichkeit und das Sommerverhalten begrenzt.

Für die Optimierung der Süd- und Ostfenstergröße wurden eine Außenwanddämmstärke von 30 cm und der Fenstertyp 3 verwendet.

2.4.3.3.1 Differenzkosten

Die Kostenunterschiede ergeben sich aus den Anschaffungskosten der Fenster und der notwendigen Verschattungseinrichtungen und aus den Heizkosten, die bei den unterschiedlichen Fensteranteilen anfallen.

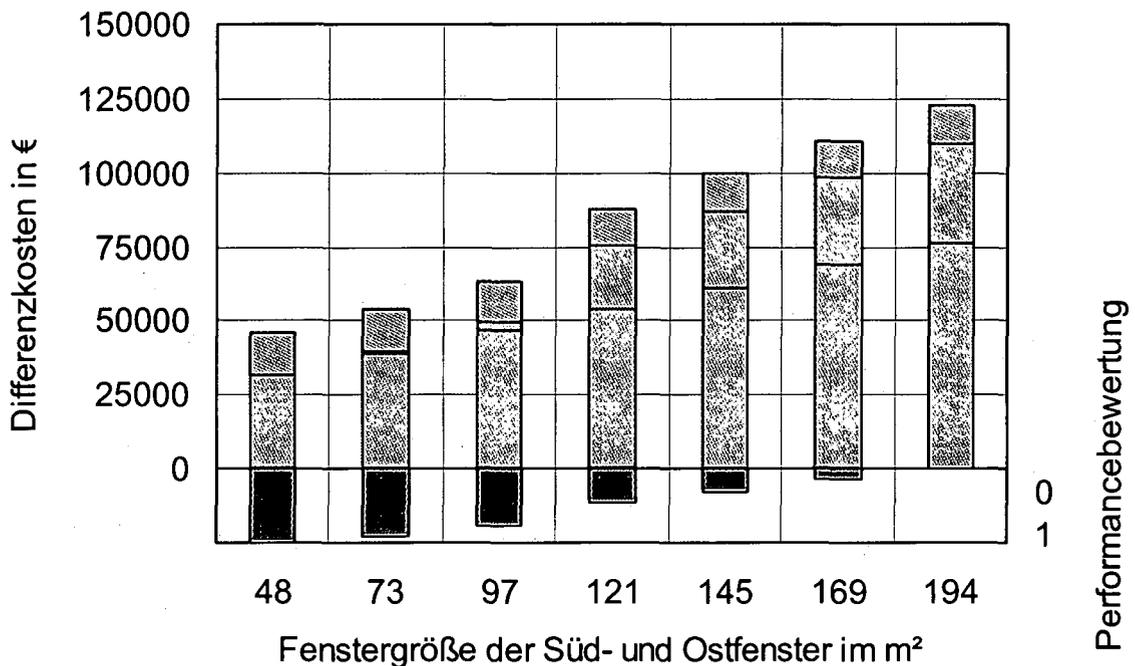
Für die Optimierung der Fenstergröße wird der optimale Fenstertyp F3 mit Anschaffungskosten von ca. 250 €/m² verwendet. Die durch das Fenster ersetzte Betonwand mit Vollwärmeschutz wird mit 100 €/m² in die Berechnung aufgenommen. Die Kostenentwicklung mit der Fenstergröße wird linear angesetzt.

Um eine sommerliche Überwärmung zu verhindern, sind entsprechend den solaren Gewinnen Verschattungsmaßnahmen notwendig. Die dadurch entstehenden Kosten werden mit 47 €/m² Fenster für eine innenliegende Jalousie mit einem Verschattungsgrad von 0,85 und mit 175 €/m² Fenster für eine außenliegende Jalousie mit einem Verschattungsgrad von 0,25 abgeschätzt.

Für die Beheizung sind wiederum Kosten in der Höhe von 0,06 €/kWh angesetzt.

In der folgenden Abbildung sind die Differenzkosten für die Anschaffung der Fenster, für die notwendige Verschattung und die Kosten für die Beheizung der Konfigurationen mit unterschiedlichen Fenstertypen dargestellt. Im unteren Diagrammabschnitt ist die Performancebewertung der Gesamtdifferenzkosten der Fenster dargestellt.

■ Investitionskosten ■ Kosten für Verschattung ■ Heizkosten ■ Heizkosten



Fenstergröße Süd- und Ostfenster in m²	Investitionskosten in €	Kosten für Verschattung in €	Heizkosten in €	Gesamtkosten in €	Performancebewertung
48	31723	0	14533	46256	1,00
73	39121	878	13817	53816	0,90
97	46519	3268	13310	63097	0,78
121	53917	21164	12686	87767	0,45
145	61314	25397	12976	99688	0,30
169	68712	29630	12552	110894	0,15
194	76110	33863	12421	122394	0,00

Abb. 22 Differenzkosten und Performancebewertung der Fenstergrößen

Die Investitionskosten für die Fenster verursachen den wesentlichen Anteil an den für 30 Jahre berechneten Gesamtkosten. Eine Vergrößerung der Fenster verringert die Aufwendungen für die Beheizung. Allerdings kann diese Ersparnis die Kosten für die Mehrinvestition bei den Fenstern und bei der Verschattung nicht ausgleichen. Das kostenmäßige Optimum liegt bei der minimalen Fenstergröße.

2.4.3.3.2 HWB, Heizlast und Somerverhalten

In der folgenden Tabelle sind die Heizwärmebedarfswerte (HWB), die Heizlasten jeweils bezogen auf die Wohnnutzfläche und die Performancebewertungen der unterschiedlichen Fenstertypen dargestellt.

Fenstergröße Süd- und Ostfenster in m ²	HWB in kWh/m ² a	Performancebewertung HWB	Heizlast im W/m ²	Performancebewertung Heizlast
48	15,86	0,00	8,31	1,00
73	15,08	0,00	8,72	1,00
97	14,52	1,00	9,13	1,00
121	13,84	1,00	9,54	1,00
145	14,16	1,00	9,95	1,00
169	13,70	1,00	10,36	0,00
194	13,55	1,00	10,77	0,00

Tab. 29 Heizwärmebedarfswerte, Heizlasten und Bewertungen

Mit den Fenstergrößen ab 97 m² wird beim Passivhaus Utendorfgasse in der angesetzten Konfiguration die Grenze für den Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a unterschritten. Die Varianten ab einer Fensterfläche von 169 m² benötigen eine Heizlast von mehr als 10 W/m², was deren Ausscheiden zur Folge hat.

Ohne Verschattungsmaßnahmen wäre nur die Variante mit minimalem Fensteranteil sommertauglich. Um eine sommerliche Überhitzung zu verhindern, sind entsprechen den solaren Gewinnen Verschattungen erforderlich. In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Verschattungsmaßnahmen aufgelistet.

Fenstergröße Süd- und Ostfenster in m ²	notwendige Verschattung	Performancebewertung Sommer
48	keine	1,00
73	Innenverschattung im DG	1,00
97	Außenverschattung im DG	1,00
121	Außenverschattung bei allen Süd- und Ostfenster	1,00
145		1,00
169		1,00
194		1,00

Tab. 30 Notwendige Verschattungen

Die daraus resultierenden Kosten sind bereits im vorangehenden Punkt berücksichtigt.

2.4.3.3.3 Performanceoptimum

In der folgenden Abbildung sind die Performancebewertungen der Fenstertypen dargestellt.

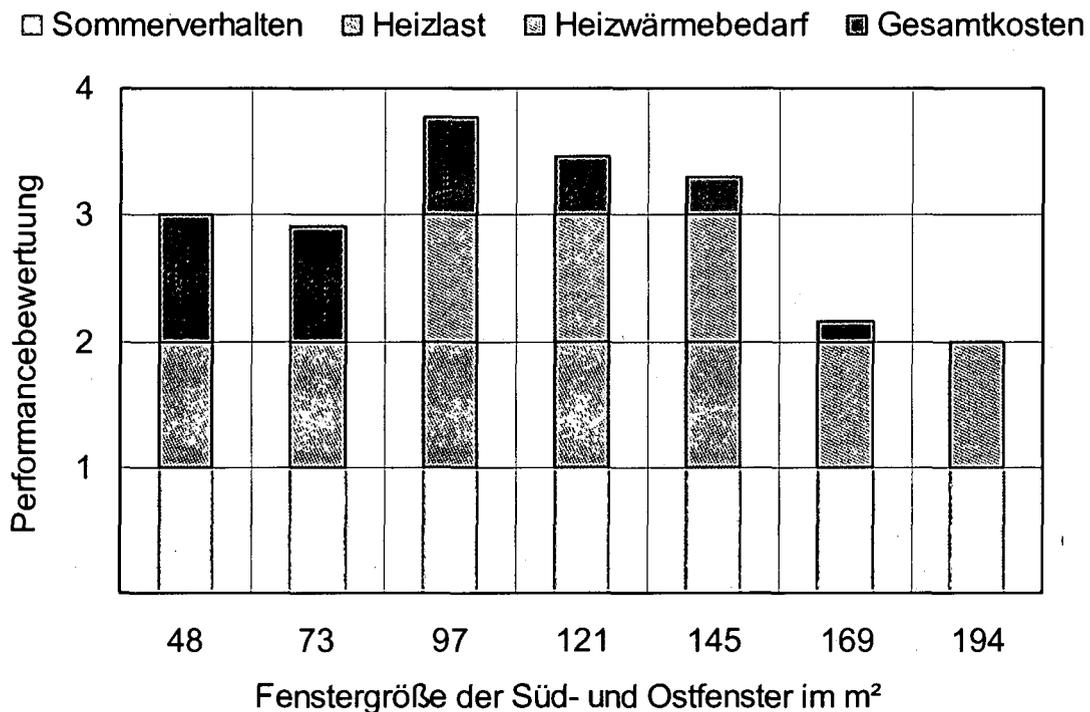


Abb. 23 Performancebewertung der Fenstergrößen

Die beiden Variante mit der kleinsten bzw. die beiden mit der größten Fensterfläche sind nicht tauglich. Die Variante mit 97 m² Fensterfläche ist aufgrund der geringeren Investitionskosten gegenüber der Varianten mit 121 m² und 145 m³ im Vorteil. Das bauphysikalische Performanceoptimum liegt für das untersuchte Gebäude bei 97 m² Fenstergröße der Süd- und Ostfenster. Die gesamte Fensterfläche entspricht ungefähr 17 % der Wohnnutzfläche.

2.4.4 Energetischer Nachweis

Das thermische Verhalten in Hinblick auf den Heizwärmebedarf, die Heizlast und das Sommerverhalten ist in diesem Abschnitt für die Variante mit der optimalen bauphysikalischen Performance berechnet.

2.4.4.1 Heizwärmebedarf

In der folgenden Tabelle sind die Heizwärmebedarfswerte in kWh/a und die bruttogeschossflächen- und wohnnutzflächebezogenen Heizwärmebedarfswerte in kWh/m²a von Haus 2 aufgelistet.

Ge- schoss	Einheit	Ver- brauch in kWh/a	BGF ²⁾ in m ²	HWB/BGF in kWh/m ² a	WNF ³⁾	HWB/WNF in kWh/m ² a
EG	Stiegenhaus TG	- ¹⁾	35,43	-	-	-
	Wohnung 2.1	1829	111,30	16,43	86,22	21,21
	Wohnung 2.2	1655	87,94	18,81	73,96	22,37
	Fahrradraum	-	29,44	-	-	-
	WF u. Stiegenh. EG	-	35,43	-	-	-
1.OG	Wohnung 2.3	1127	87,94	12,81	73,64	15,30
	Wohnung 2.4	258	62,10	4,15	44,36	5,82
	Wohnung 2.5	860	87,94	9,78	73,96	11,63
	Stiegehaus 1.OG	-	44,73	-	-	-
2.OG	Wohnung 2.6	767	87,94	8,73	73,64	10,42
	Wohnung 2.7	251	62,10	4,04	44,36	5,65
	Wohnung 2.8	825	87,94	9,39	73,96	11,16
	Stiegehaus 2.OG	-	35,43	-	-	-
3.OG	Wohnung 2.9	876	87,94	9,96	73,64	11,89
	Wohnung 2.10	247	62,10	3,98	44,36	5,57
	Wohnung 2.11	963	87,94	10,95	73,96	13,02
	Stiegehaus 3.OG	-	35,43	-	-	-
DG	Wohnung 2.12	2130	127,83	16,66	96,32	22,11
	Wohnung 2.13	1034	65,73	15,73	50,91	20,31
	Stiegehaus DG	-	35,43	-	-	-
Summe bzw. flächenge- wichteter Mittelwert		12826	1358,01	9,44	883,2 9	14,52
¹⁾ unbeheizte Räumlichkeiten, ²⁾ Bruttogeschossfläche, ³⁾ Wohnnutzfläche						

Tab. 31 Heizwärmebedarf in Haus 2

Im Haus 2 ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 12826 kWh/m²a. Im Mittel liegt der Heizwärmebedarf bezogen auf die Wohnnutzfläche unter den angestrebten 15 kWh/m²a. In die Wohnungen im Erd- und im Dachgeschoss kann diese Grenze nicht eingehalten werden.

Im Projekt Utendorfgasse wird in den Erd- und Dachgeschosswohnungen die zusätzlich benötigte Heizwärme über extra Heizflächen eingebracht. [ANW03]

2.4.4.2 Heizlast

In der folgenden Tabelle sind die Heizlasten in W/m^2 und die bruttogeschossflächen- und wohnnutzflächebezogenen Heizlasten in kWh/m^2a der Wohnungen und sonstigen Räumlichkeiten in Haus 2 aufgelistet.

Ge- schoss	Einheit	Heiz- last in W	BGF in m^2	Heizlast / BGF in W/m^2	WNF	Heizlast / WNF in W/m^2
EG	Stiegenhaus TG	-	35,43	-	-	-
	Wohnung 2.1	920	111,30	8,27	86,22	10,67
	Wohnung 2.2	806	87,94	9,17	73,96	10,90
	Fahrradraum	-	29,44	-	-	-
	WF u. Stiegenh. EG	-	35,43	-	-	-
1.OG	Wohnung 2.3	626	87,94	7,12	73,64	8,50
	Wohnung 2.4	305	62,10	4,91	44,36	6,87
	Wohnung 2.5	582	87,94	6,62	73,96	7,87
	Stiegehaus 1.OG	-	44,73	-	-	-
2.OG	Wohnung 2.6	521	87,94	5,92	73,64	7,07
	Wohnung 2.7	305	62,10	4,91	44,36	6,87
	Wohnung 2.8	582	87,94	6,62	73,96	7,87
	Stiegehaus 2.OG	-	35,43	-	-	-
3.OG	Wohnung 2.9	567	87,94	6,45	73,64	7,71
	Wohnung 2.10	305	62,10	4,91	44,36	6,87
	Wohnung 2.11	621	87,94	7,06	73,96	8,39
	Stiegehaus 3.OG	-	35,43	-	-	-
DG	Wohnung 2.12	1315	127,83	10,29	96,32	13,65
	Wohnung 2.13	608	65,73	9,25	50,91	11,94
	Stiegehaus DG	-	35,43	-	-	-
Summe bzw. flächenge- wichteter Mittelwert		8062	1358,01	5,94	883,29	9,13

Tab. 32 Heizlast in Haus 2

Die Gebäudeheizlast beträgt 8062 W. Die Heizlast bezogen auf die Wohnnutzfläche liegt im Mittel bei $9,13 W/m^2$. Im Projekt Utendorfgasse sind in den Wohnungen im Erd- und im Dachgeschoß zum Einbringen der notwendigen Heizlast extra Heizflächen vorhanden.

2.4.4.3 Sommerverhalten

In der folgenden Tabelle sind die normierten nicht nutzbaren Gewinne Q_{NN} der Wohnungen und sonstigen Räumlichkeiten in Haus 2, die Übertemperaturgradstunden H26 in % bezogen auf ein Jahr und die notwendigen Verschattungseinrichtungen aufgelistet.

Ge- schoss	Einheit	BGF in m ²	WNF	Verschatt- ung	QNN in Kh	H26 in %
EG	Stiegenhaus TG	35,43	-	-	0	0,00
	Wohnung 2.1	111,30	86,22	-	50	0,07
	Wohnung 2.2	87,94	73,96	-	109	0,14
	Fahrradraum	29,44	-	-	0	0,00
	WF u. Stiege EG	35,43	-	-	0	0,00
1.OG	Wohnung 2.3	87,94	73,64	-	46	0,06
	Wohnung 2.4	62,10	44,36	-	81	0,11
	Wohnung 2.5	87,94	73,96	-	128	0,17
	Stiegehaus 1.OG	44,73	-	-	0	0,00
2.OG	Wohnung 2.6	87,94	73,64	-	47	0,06
	Wohnung 2.7	62,10	44,36	-	81	0,11
	Wohnung 2.8	87,94	73,96	-	162	0,21
	Stiegehaus 2.OG	35,43	-	-	0	0,00
3.OG	Wohnung 2.9	87,94	73,64	-	55	0,07
	Wohnung 2.10	62,10	44,36	-	81	0,11
	Wohnung 2.11	87,94	73,96	-	128	0,17
	Stiegehaus 3.OG	35,43	-	-	0	0,00
DG	Wohnung 2.12	127,83	96,32	notwendig	54	0,07
	Wohnung 2.13	65,73	50,91	notwendig	17	0,02
	Stiegehaus DG	35,43	-	notwendig	0	0,00
Summe		1358,01	883,29		1860	

Tab. 33 Übertemperaturgradstunden in Haus 2

Im Erdgeschoss sowie im 1., 2. und 3. Obergeschoss sind keine Verschattungsmaßnahmen notwendig. Im Dachgeschoss werden zur Verhinderung der sommerlichen Überwärmung bei den südseitigen Fenstern Außenverschattungen mit einem Verschattungsgrad von 0,25 vorgesehen. Bei den Dachflächenfenstern wird eine Innenverschattung mit einem Verschattungsgrad von 0,85 installiert.

Die errechneten Werte für die Übertemperaturgradstunden liegen aufgrund der jeweils gewählten Verschattungseinrichtung unter der Grenze zur sommerlichen Überwärmung, wobei geringfügige Überschreitungen akzeptabel sind.

Die Ergebnisse stimmen mit den Anforderungen der derzeit gültigen ÖNORM B 8110-3 [ONO99] überein. Um den Normnachweis für den Wohnraum der Wohnung 2.13 im Dachgeschoss von Haus 2 zu erfüllen, ist ebenfalls eine Außenverschattung vorzusehen, während für den Schlafraum mit nordorientiertem Dachflächenfenster eine Innenverschattung genügt.

2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In Kapitel 2 ist eine Methode zur Optimierung der bauphysikalischen Performance, die sich aus dem Heizwärmebedarf, der Heizlast, dem Somerverhalten und den Kosten zusammensetzt, beschrieben.

Im ersten Abschnitt sind grundlegende Untersuchungen zur Berechnung des Heizwärmebedarfes und des Somerverhaltes enthalten. Dabei wurde ermittelt, dass eine Unterscheidung bei der Berechnung des Heizwärmebedarfes nach ÖNORM EN 832 zwischen dezentraler und zentraler Wärmerückgewinnung nicht notwendig ist.

Zur Berechnung der sommerlichen Tauglichkeit wurde eine Weiterentwicklung der ÖNORM EN 832 verwendet. Dieses Verfahren betrachtet die Gewinnanteile, die nicht zur Minderung des Heizwärmebedarfes beitragen, und somit die Raumtemperatur erhöhen. Der Zusammenhang für Wiener Klimabedingungen wurde ermittelt.

Aus der systematischen Variation verschiedener Eingangsparameter wurde eine bauphysikalisch und kostenmäßig optimierte Konfiguration des Gebäudes ermittelt. Dazu wurden schrittweise die Investitions- und Heizkostenunterschiede für verschiedene Varianten ermittelt. Die Investitionskosten wurden mit marktüblichen Preisen abgeschätzt. Zur Berechnung der Kosten für die Beheizung fand die Barwertmethode Verwendung.

Das im Projekt „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau“ untersuchte Passivhaus Utendorfasse in Wien bildet die Grundlage des dargestellten Berechnungsbeispiels. Die Performanceoptimierung wurde für die Wanddämmstärke, den Fenstertyp und die Fenstergröße vorgenommen.

Für die angesetzten Randbedingungen ergibt sich eine optimale Wanddämmstärke von 30 cm. Aufgrund der Vorteile bei den Investitionskosten ist ein preiswertes Kunststofffenster der optimale Fenstertyp. Die thermisch günstigeren Holzalufenster können diesen Nachteil nicht ausgleichen. Die optimale Fenstergröße der Süd- und Ostfenster ist 97 m².

Eine Reduzierung der Wanddämmstärke bei gleich bleibendem Dämmniveau erscheint wünschenswert. In Kapitel 3 werden Glasfassadenkonstruktionen als mögliche Alternative zu den in diesem Kapitel für die Optimierung verwendeten herkömmlichen Fassaden untersucht.

3 Energetische Beurteilung von Doppelfassaden

In diesem Kapitel wird die Erfassung des thermisch-hygrischen Verhaltens einer vorgehängten Glasdoppelfassade durch Langzeitmessungen beschrieben. Die gewonnenen Daten ermöglichen die Evaluierung eines dynamischen Simulationsmodells der Glasdoppelfassade.

Mit den Simulationsergebnissen von verschiedenen Fassadenkonstruktionen, denen das validiert Strömungsmodell des Fassadenzwischenraumes zugrunde liegt, werden deren wärmetechnische Eigenschaften beurteilt. Somit kann unter Verwendung von Richtwerten für die Investitionskosten ein Kosten- /Nutzenvergleich vorgenommen werden.

Insbesondere soll mit den Ergebnissen ein möglicher Einsatz von Glasdoppelfassaden in mehrgeschossigen Passivbauten anstelle einer herkömmlichen Fassaden, wie sie bei der Optimierung der bauphysikalische Performance in Kapitel 2 verwendet wurde, beurteilt werden.

3.1 Einleitung

Mehrschalige, transparente Glasfassadensysteme stellen Hüllkonstruktionen von Gebäuden dar, bei denen vor bzw. hinter der eigentlichen Außenhaut eine zusätzliche Verglasung angeordnet ist, um funktionale Anforderungen wie Wärmeschutz, Sonnenschutz, Schallschutz oder die Möglichkeit eines natürlichen Luftwechsels zu verbessern. [LAN00]

In der vorliegenden Arbeit sollen die wichtigsten Arten von durchströmten Fassaden vorgestellt werden. Anhand eines Simulationsmodells werden die Wärmeschutzeigenschaften verschiedener Varianten mit und ohne Glasdoppelfassade berechnet. Die Simulationsergebnisse sollen einen Kosten-Nutzenvergleich von Doppelfassaden mit herkömmlichen Wärmedämmverbundsystemen ermöglichen.

3.1.1 Arten von durchströmten Fassaden

Die Einteilung der Fassadentypen kann wie folgt vorgenommen werden: [LAN00]

Nach der Positionierung der Verglasungsebenen in Bezug zur Außenwandkonstruktion, die wesentlichen Einfluss auf Funktion und Gestalt der Fassade hat:

- Zweite Glasschale liegt innerhalb der Außenwand – mehrschalige Fenstersysteme in der Lochfassade
- Zweite Glasschale ist in Teilbereichen der Außenwand vorgelagert
- Zweite Glasschale erstreckt sich über die gesamte Gebäudehülle – Doppelfassade

Nach der Lage der Lüftungsöffnungen in der inneren und äußeren Schale, welche die Möglichkeit der natürlichen Lüftung von Innenräumen bestimmt:

- Lüftungsöffnungen in beiden Schalen
- Lüftungsöffnungen in der inneren Schale
- Keine Lüftungsöffnungen

Nach der Segmentierung die Brandverhalten, Schallschutz und Strömungsverhalten der Luft im Fassadenzwischenraum beeinflusst:

- Fassadenzwischenraum nicht unterteilt
- Fassadenzwischenraum unterteilt

Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten in Hinsicht auf die Segmentierung werden im Folgenden vorgestellt.

3.1.1.1 Unsegmentierte Vorhangfassaden

Bei dieser einfachsten Form einer Doppelfassade wird der Konstruktion eine Glasfront vorgestellt, die je nach Ausführungsform eine geschlossene Ebene bildet oder Öffnungen z. B. in Form von Fugen aufweist. Der somit entstandene Fassadenzwischenraum ist nicht in Abschnitte unterteilt und in der Regel nach allen vier Seiten hin offen.

Sollen neben den schalltechnischen Verbesserungen auch Vorteile für den winterlichen Wärmeschutz erzielt werden, dann wird die Fassade seitlich geschlossen und mit boden- bzw. dachnahen regelbaren Klappen versehen.

3.1.1.2 Umlufffassaden

Bei diesem Konstruktionstyp ist die vorgehängte Fassade im Abstand von zwei bis drei Geschossen durch horizontale Bauteile aus Metall oder Glas getrennt. Der Fassadenkorridor mit zwei- oder dreifacher Geschosshöhe wird analog zum vorherigen Fassadentyp unten und oben mit Klappen versehen. Weiters werden über dem Gebäudeumfang verteilt vertikale Ventilatorschienen angebracht, die im Fassadenzwischenraum eine horizontale Umwälzung der Luft erzeugen. Diese überlagert sich mit der freien Konvektionsströmung.

Im Winter und in den Übergangsjahreszeiten bewirkt dieser Umluftbetrieb eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Fassadenzwischenraum. Solare Gewinne werden auf alle Seiten des Gebäudes verteilt.

3.1.1.3 Korridorfassaden

Der Fassadenzwischenraum wird bei der Korridorfassade in vertikaler Richtung geschossweise unterteilt und horizontal nur dort abgeschottet, wo es akustisch, brand- oder lüftungstechnisch notwendig ist. Die Zu- und Abluftöffnungen in der Außenfassade werden in Boden- bzw. Deckennähe meist achsweise versetzt angeordnet, um

das Einlüften von verbrauchter Luft des darunter liegenden Geschosses zu verhindern.

3.1.1.4 Kasten-Kasten-Fassaden

Der Aufbau dieser Ausführungsform unterscheidet sich von der Korridorfassade dahingehend, dass zur vertikalen Trennung der Geschosse zusätzlich je Achsabschnitt eine horizontale Segmentierung durch vertikale Lisenen vorgenommen ist. Ähnlich dem traditionellen Kastenfenster stellt das einzelne Fensterelement eine in sich geschlossene Einheit dar, die in Lüftungstechnischer Hinsicht nicht mit den benachbarten Elementen in Verbindung steht.

Jede Fassadeneinheit weist eigene Lüftungsöffnungen auf, die diagonal versetzt angeordnet werden, um Kurzschlusslüftungen zu vermeiden. In der Regel werden zwei der belüfteten Fensterkästen zusammengefasst.

3.1.1.5 Schacht-Kasten-Fassaden

Diese Konstruktionsform basiert auf der Kasten-Kasten-Fassade, wobei die horizontalen Unterteilungen bei den abluftführenden Fassadenelementen weggelassen werden, so dass über mehrere Geschosse durchlaufende Vertikalschächte mit Kaminwirkung entstehen. Dadurch wird die Luft aus den Kastenfenstern in den benachbarten Schacht gesaugt und an dessen Kopf ins Freie abgeleitet. Die Schacht-Kasten-Fassade erfordert weniger Öffnungen in der Außenhaut, da ein größerer thermischer Auftrieb im Kamin entsteht.

3.2 Energieströme durch Fassaden

Die Möglichkeiten zur Verbesserung des Energieflusses durch eine Fassadenkonstruktion, um die Energiebilanz des dahinter liegenden Raumes zu beeinflussen, teilen sich in zwei Fälle.

Im Sommer kann der Kühlbedarf mit folgenden Maßnahmen minimiert werden:

- Herabsetzen des U-Wertes
- Herabsetzen der Absorption an den Außenoberflächen
- Erhöhen des äußeren Wärmeüberganges, damit Strahlungsgewinne verstärkt nach außen abfließen
- Reduktion der Einstrahlung durch Beschattung
- Nachtlüftung

Im Winter kann der Heizbedarf mit folgenden Maßnahmen minimiert werden:

- Herabsetzen des U-Wertes
- Erhöhen der Absorption
- Herabsetzen des äußeren Wärmeüberganges, damit Strahlungsgewinne verstärkt nach innen fließen

Ein niedriger U-Wert wirkt als einzige Maßnahme im Winter und Sommer positiv, da er die Energieflüsse in beiden Richtungen vermindert. Alle anderen Maßnahmen führen im Sommer und Winter zu entgegengesetzten Auswirkungen, welche ein entsprechend adaptives Verhalten verlangen. [KEL97]

3.2.1 Energieströme in einer Glasdoppelfassade

In der folgenden Abbildung sind die Energieströme in einer Glasdoppelfassade, bestehend aus Glasvorsatzschale, Fassadenzwischenraum und Wandkonstruktion dargestellt.

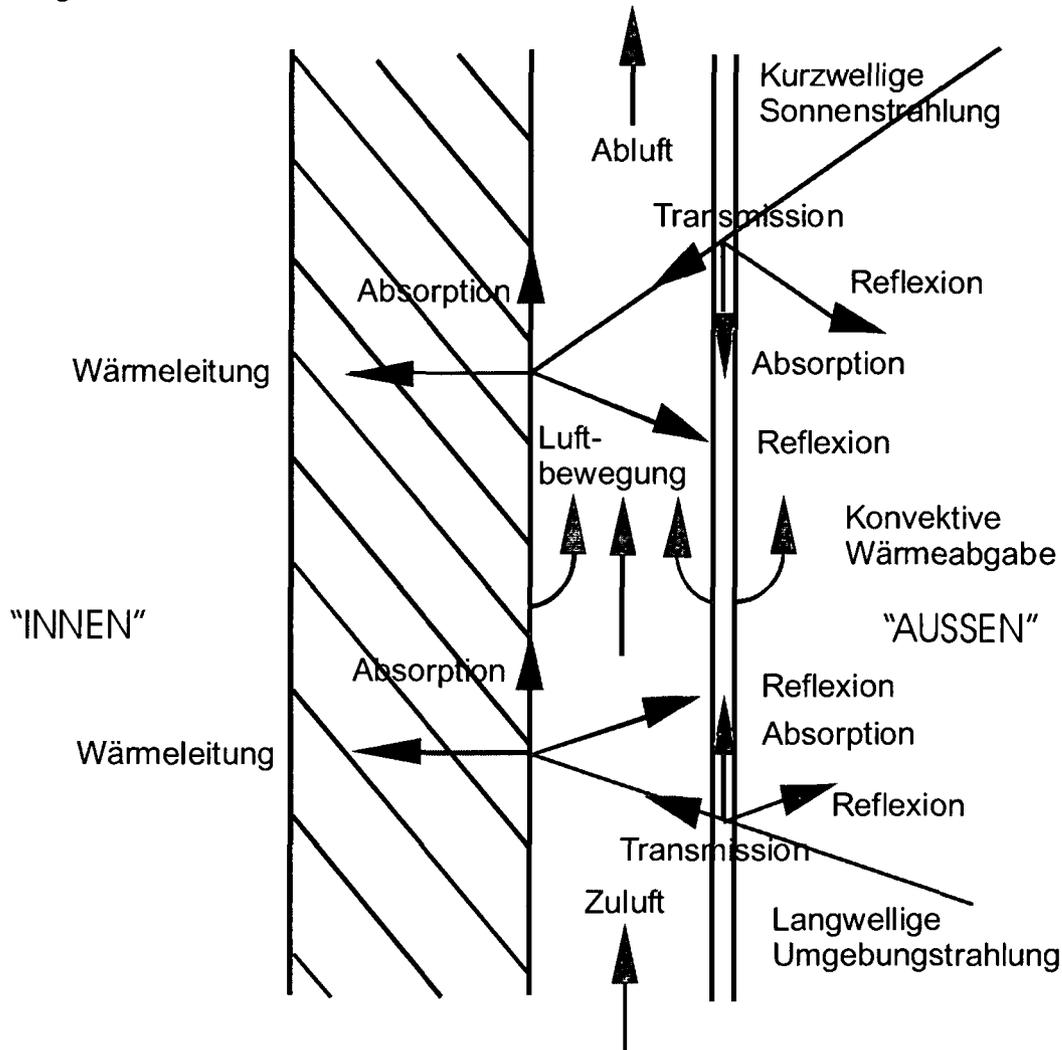


Abb. 24 Prinzipskizze der auftretenden Energieströme

Besonderen Einfluss auf die Energiebilanz einer Glasdoppelfassade nehmen:

3.2.1.1 Strahlung

Die einfallende Sonnenstrahlung wird an der äußeren Scheibe zum Teil reflektiert und absorbiert. Der Transmissionsanteil trifft auf die Innenkonstruktion und wird neuerlich zerlegt. Der hier reflektierte Anteil trifft wieder auf die äußere Glasscheibe usw. Langwellige Umgebungsstrahlung, die auf die Fassade trifft, wird analog zur kurzwelligen in Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsanteile zerlegt.

Die Größe der Anteile hängt vom Spektralbereich und von den Eigenschaften der Baustoffe ab.

3.2.1.2 Luftströmungen

Die Luftströmungen in einer Doppelfassade sind einerseits von den konstruktiven Randbedingungen abhängig, andererseits werden sie durch thermischen Auftrieb und Wind beeinflusst.

Durch Absorption der Strahlungsenergie in den Bauteilen steigen deren Temperaturen und sie geben Wärme an die umgebende Luft ab. Durch die entstehenden Temperaturunterschiede im Fassadenzwischenraum bzw. zur Außenluft bildet sich thermischer Auftrieb aus. Druckdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft, die durch Windanströmungen verursacht werden, sind ein weiterer Antrieb für Luftbewegungen im Fassadenzwischenraum.

3.2.1.3 Bauteilzustände

Der Energiegehalt der Glasscheibe und der Betonwand wird durch die absorbierte Strahlung erhöht. Die Strahlungsgewinne werden durch den Infrarotstrahlungsaustausch mit anderen Oberflächen abgestrahlt, konvektiv an die Luft im Fassadenzwischenraum bzw. an die Außenluft abgegeben und ins Wandinnere weitergeleitet.

Je nach Temperaturgradient wird Wärme über die Wandkonstruktion geleitet. Die Glasdoppelfassade vermindert den winterlichen Wärmeverlust durch die Strahlungsgewinne und durch gegenüber den Außenverhältnissen erwärmte Luft im Fassadenspalt.

3.2.2 Energetische Möglichkeiten einer Doppelfassade

In energetischer Hinsicht können die Vorteile einer Konstruktion mit Doppelfassade folgende Punkte umfassen:

- Verbesserung des U-Wertes
- bei Sonneneinstrahlung Wirkung als Solarkollektor
- Erhöhung des äußeren Wärmeüberganges
- die Luft im Fassadenzwischenraum wirkt als zusätzliche Pufferschicht, da sie wärmer als die Außenluft ist
- die Steuerung des Luftaustausches im Fassadenzwischenraum ermöglicht das Abführen sommerlicher Hitze
- Ermöglichen der natürlichen Lüftung bei starker Windbelastung unter Aufrechterhaltung der schallschutztechnischen Anforderungen
- Verschattungselemente im Fassadenzwischenraum sind vor Windbelastung geschützt und die Wärme wird nach oben abgeführt
- Witterungs- und Einbruchschutz bei Nachtlüftung

3.3 Zu den Messungen

Die Messungen wurden für das Projekt „Thermisch-hygrisches Verhalten von Glasdoppelfassaden unter solarer Einwirkung- Theorieevaluierung durch Vorortmessung“ vorgenommen. [HDZ02] Das Projekt wurde im Rahmen des Impulsprogramms „Haus der Zukunft“, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.

Die südseitige Außenwandkonstruktion mit vorgehängter Glasfassade des Bundesinstituts für Sozialpädagogik in Baden bei Wien war Gegenstand der Langzeitmessungen. Zur Erfassung der Zustände in der Konstruktion wurden Temperaturen, Luftfeuchtigkeiten, Wärmeströme, Strömungsgeschwindigkeiten im Fassadenzwischenraum, Differenzdrücke zwischen Fassadenzwischenraum und Außen, Strahlungen und das Außenklima gemessen.

Der Einbau, die Verkabelung der Sensoren sowie der Messbetrieb fanden unter größtmöglicher Schonung des Gebäudes und minimalster Störung des Schulbetriebes statt. Eine temporäre Demontage der Glasfassade zum Zwecke des Messaufbaus wurde unter anderem aus wirtschaftlichen Gründen unterlassen.

3.3.1 Unterteilung in Messbereiche

Die Südfassade ist in einen Raster unterteilt, um die Positionen für die Anordnung der Sensoren festlegen zu können. Die Fassadenelemente werden in Längsrichtung fortlaufend nummeriert. Die Elementnummer 1 wird dem Element rechts neben der Doppeltür im Kellergeschoss zwischen Fassadenachse 5 und 6 zugeordnet. Die Gliederung der Höhe nach erfolgt anhand der Geschossbezeichnungen. Die Messpunkte erhalten eine Kurzbezeichnung, die auch in den Datentabellen und Grafiken verwendet werden.

Die Fassade wurde in mehreren Abschnitten vermessen. Die im Folgenden beschriebene Messung „Wand“ wurde im Bereich zwischen dem 8. und dem 12. Element vorgenommen, da hier das ungestörte Verhalten der über fünf Geschosse durchlaufenden Fassadenkonstruktion beobachtbar ist.

Die Messung „Fenster“ wurde im Bereich der Elemente 1 bis 7 durchgeführt. Die Verhältnisse im Fassadenzwischenraum werden in diesem Abschnitt von Fensterkästen beeinflusst. Diese sind bündig mit der Außenhaut angeordnet und die Laibungen sind umlaufend bis zur Innenseite der Außenwand verkleidet. Es findet kein Luftaustausch zwischen den Fensterbauteilen und dem Fassadenzwischenraum statt.

Um störende Querströmungen im Fassadenzwischenraum auszuschließen, wurden an den Rändern der Messbereiche vertikale Trennelemente eingebaut. Diese Trennungen bestanden aus Kunststoffschläuchen, die von einem Gebläse mit Schalldämpfer unter Überdruck gehalten wurden. Der Durchmesser der Schläuche war größer als der Fassadenspalt, sodass sie satt am Glas bzw. an der Betonwand anlagen und dadurch die Messbereiche abtrennten.

In der folgenden Fotografie ist der als Abschottung verwendete Kunststoffschlauch im eingebauten Zustand ersichtlich.

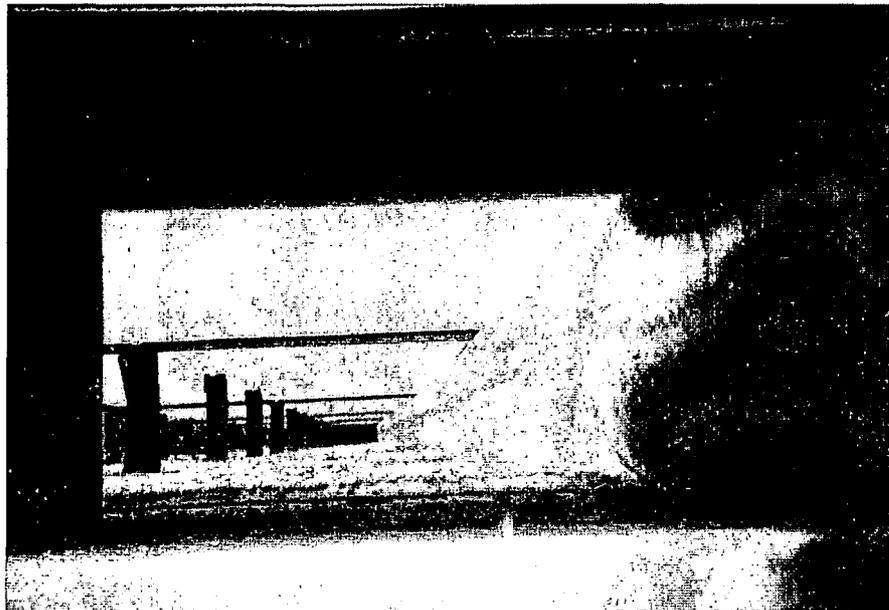


Abb. 25 Im Fassadenzwischenraum eingebaute Abschottung

3.3.2 Messung „Wand“

In der vom 24.10.2001 bis zum 26.01.2002 laufenden Messung „Wand“ waren die Klappen geschlossen. Die anderen Messfälle sind in [HDZ02] enthalten.

Generell wurden die Messpunkte nicht in der Nähe von Fassadenbefestigungen angeordnet. Die Sensorik der Messung „Wand“ war mittels eines 2 cm dicken Metallrohres, das von der Attika aus eingebracht und direkt an der Gebäudewand befestigt wurde, in vertikaler Richtung positioniert. Horizontale Auskragungen wurden mittels geeigneter Metallprofile hergestellt. Die Halterungen wurden so ausgeführt, dass sie die *minimalste strömungstechnische Behinderung* darstellten. Die Verkabelung und die fallweise erforderlichen Messumformer der Sensoren wurden an der Tragkonstruktion montiert.

3.3.2.1 Temperatur und Luftfeuchte

Die Sensoren wurden im Messfall „Wand“ über die Gebäudehöhe verteilt angeordnet, um die Schichtung der Luft im Fassadenspalt zu beobachten.

An den fünf Positionen **KG, EG, 1.OG, 2.OG, 3.OG** wurden die Temperatur und die Luftfeuchte jeweils in Geschoßmitte und in der Mitte des Elements 10 gemessen. Um die Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit im Fassadenzwischenraum ohne den Einfluss von direkter Sonnenbestrahlung zu erfassen, wurden die Sensoren in einem lotrecht stehenden Rohr angeordnet.

In der folgenden Fotografie sind die Temperatur- und Feuchtemessfühler und deren Halterung in der Messanordnung „Wand“ ersichtlich.

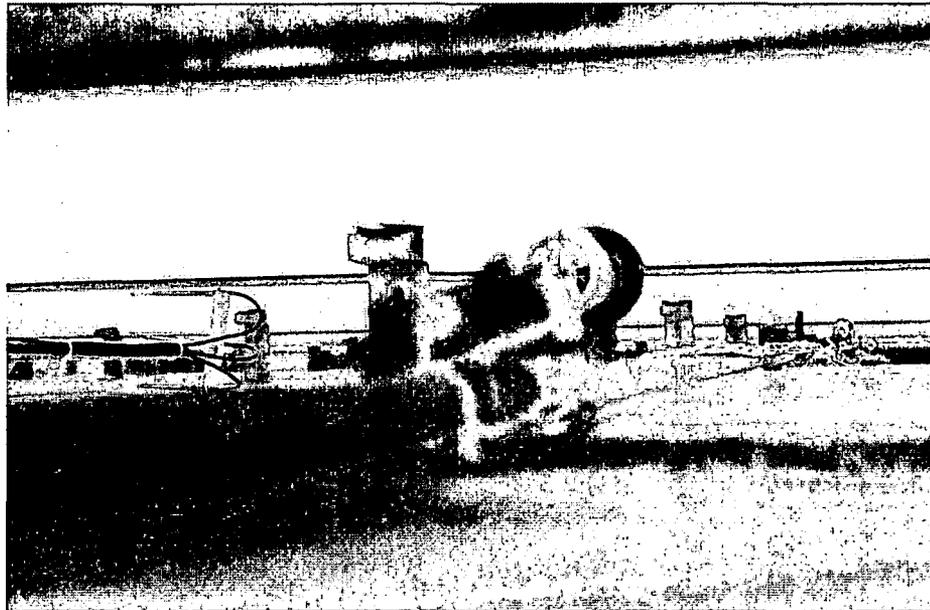


Abb. 26 Temperatur- und Feuchtemessfühler des Messfalles „Wand“

Am linken Rand des Bildes sind die Heizdrähte und deren Halterung zu erkennen.

3.3.2.2 Strömungsgeschwindigkeit

In der Messung „Wand“ wurde an zwei Messstellen im 3.OG das Strömungsgeschwindigkeitsprofil bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten **H1**, **H2**, **H3** wurden in Mitte des Elements 9 ca. 2,5 m von der Fassadenoberkante und **H4**, **H5**, **H6** wurden in Mitte des Elements 11 ca. 1,5 m von der Fassadenoberkante gemessen. Je Messung waren drei Messpunkte vorgesehen. Jeweils ein Sensor (**H2**, **H5**) war in der Mitte des Luftspaltes platziert, die anderen in einem Abstand von ca. 1 cm zur Betonwand (**H1**, **H4**) bzw. zur Glasscheibe (**H3**, **H6**).

3.3.2.3 Differenzdruck

Der Differenzdruck **DD** wurde zwischen der Außenluft vor der Fassade und dem Fassadeninneren im Bereich der Ausströmöffnungen bei Element 10 im obersten Geschoss gemessen. Damit konnte auf den Strömungsverlust über diese Öffnungen geschlossen werden.

3.3.2.4 Wärmestrom

Der Wärmestrom durch die opake Wandkonstruktion wurde mit einer auf der Innenoberfläche im Technikraum des 1. Obergeschosses angebrachten Wärmestrommessfolie **QI** in Parapetmitte im Technikraum des 1.Obergeschosses bestimmt. Die Innenoberflächentemperatur **OI** und die Raumlufttemperatur **TI** wurden im Technikraum des 1.OG bestimmt.

Gegenüber auf der Außenoberfläche der Betonwand lagen der Wärmestromsensor **QA**, die Temperatursensoren für die verschattete (**LQ1**) und die unverschattete Lufttemperatur (**LQ2**) sowie die Oberflächentemperatur des Glases **OG**.

3.3.2.5 Strahlung

In der folgenden Fotografie sind die vor der Fassade angeordneten Strahlungsmessgeräte und deren Halterungen abgebildet.

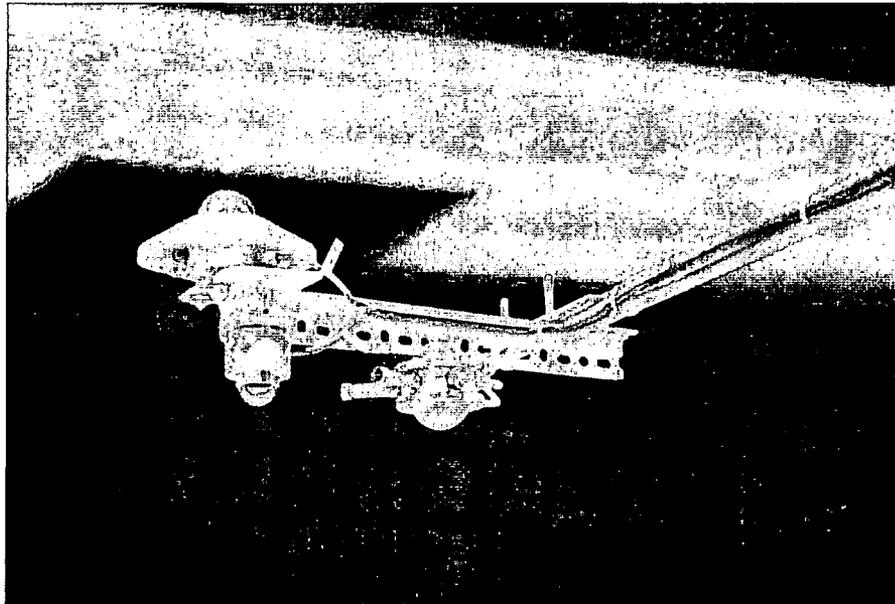


Abb. 27 Strahlungsmessinstrumente vor der Fassade

Ein Pyrradiometer Typ 8110 für den kurz- und langwelligen Bereich bestimmte die Vertikalstrahlung vor der Fassade **S3** und deren Reflexion **S4**. Die Strahlungsmessinstrumente **S1** (CM11) und **S2** (CM3) in analoger Anordnung zeichneten den kurzwelligen Strahlungsanteil auf. Die außenliegenden Strahlungsmessgeräte waren ca. 0,5 m vor dem Fassadenelement 12 im Bereich des 3. Obergeschosses so angeordnet, dass sie die innen liegenden nicht beeinflussten.

Die Strahlungsmessung mit CM3-Geräten für den kurzwelligen Bereich im Fassadenzwischenraum war bei Fassadenelement 12 im oberen Bereich des 3. Obergeschosses angeordnet. Um den Strahlungseintrag auf die Betonwand zu bestimmen, war der Strahlungsmesser **S5** auf der Außenoberfläche des Betons mit Blickrichtung Glas befestigt. Ein direkt an der Scheibe angeordneter Sensor **S6** mit Blickrichtung zur Betonoberfläche ermittelte deren Reflexion.

3.3.2.6 Wetter

Mit Hilfe der Wetterstation, die am Dach des Gebäudes aufgebaut war, wurde die Außentemperatur **TA**, die Luftfeuchtigkeit **RHA**, die Windgeschwindigkeit **WG** und -richtung **WR** und der **REGEN** gemessen.

3.3.2.7 Südansicht

In der folgenden Südansicht des Messobjekts sind beide Messabschnitte mit den zugehörigen Messpositionen dargestellt.

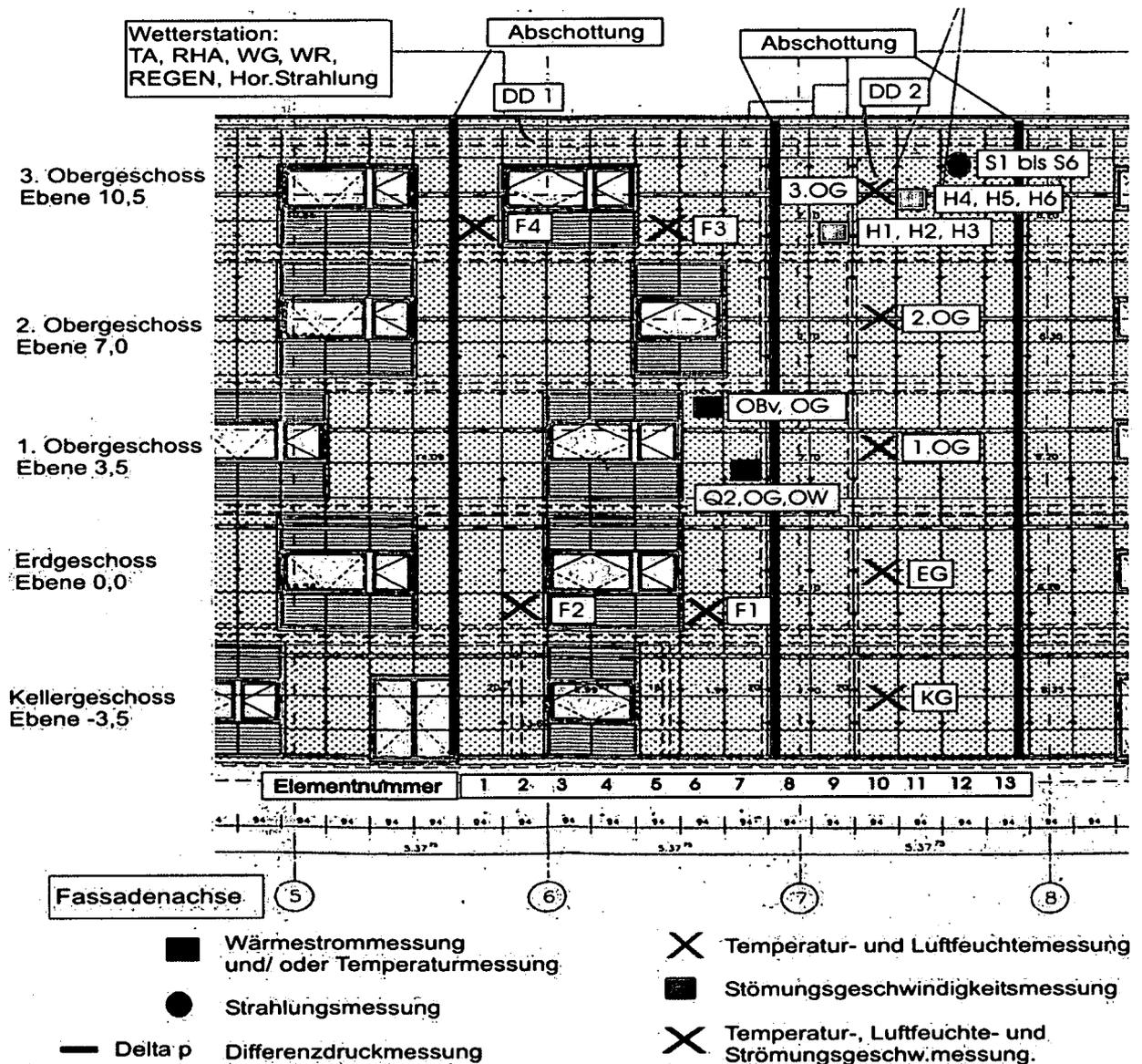


Abb. 28 Südansicht mit Messpositionen

Der Messabschnitte „Fenster“ erstreckt sich von Fassadenelement 1 bis 7 und der Messabschnitt „Wand“ von Fassadenelement 8 bis 13.

3.3.2.8 Schnitt

Im folgenden Schnitt durch das Fassadenelement 10 sind die Messpositionen des Messfalls „Wand“ schematisch dargestellt.

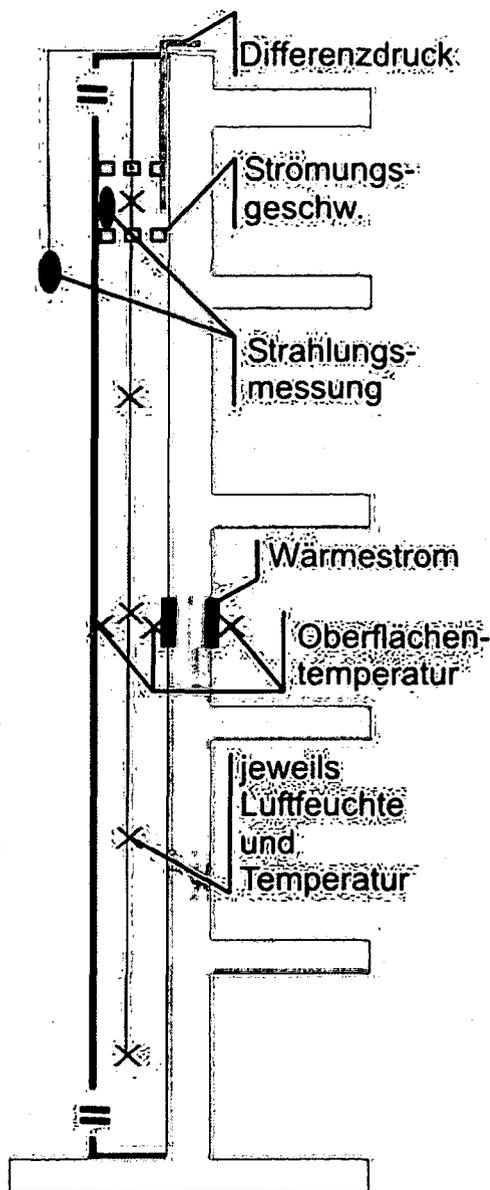


Abb. 29 Schnitt durch die Südfassade im Fassadenelement 10 mit Anordnung der Messstellen

In der schematischen Schnittdarstellung der Südfassade sind die Messpunkte verzeichnet. Die Breite des Fassadenspaltes ist 14 cm. In der Zeichnung ist die Spaltbreite vergrößert dargestellt.

3.3.2.9 Detail Attika

In der folgenden Abbildung ist für den Messfall „Wand“ der Attikabereich detailliert dargestellt.

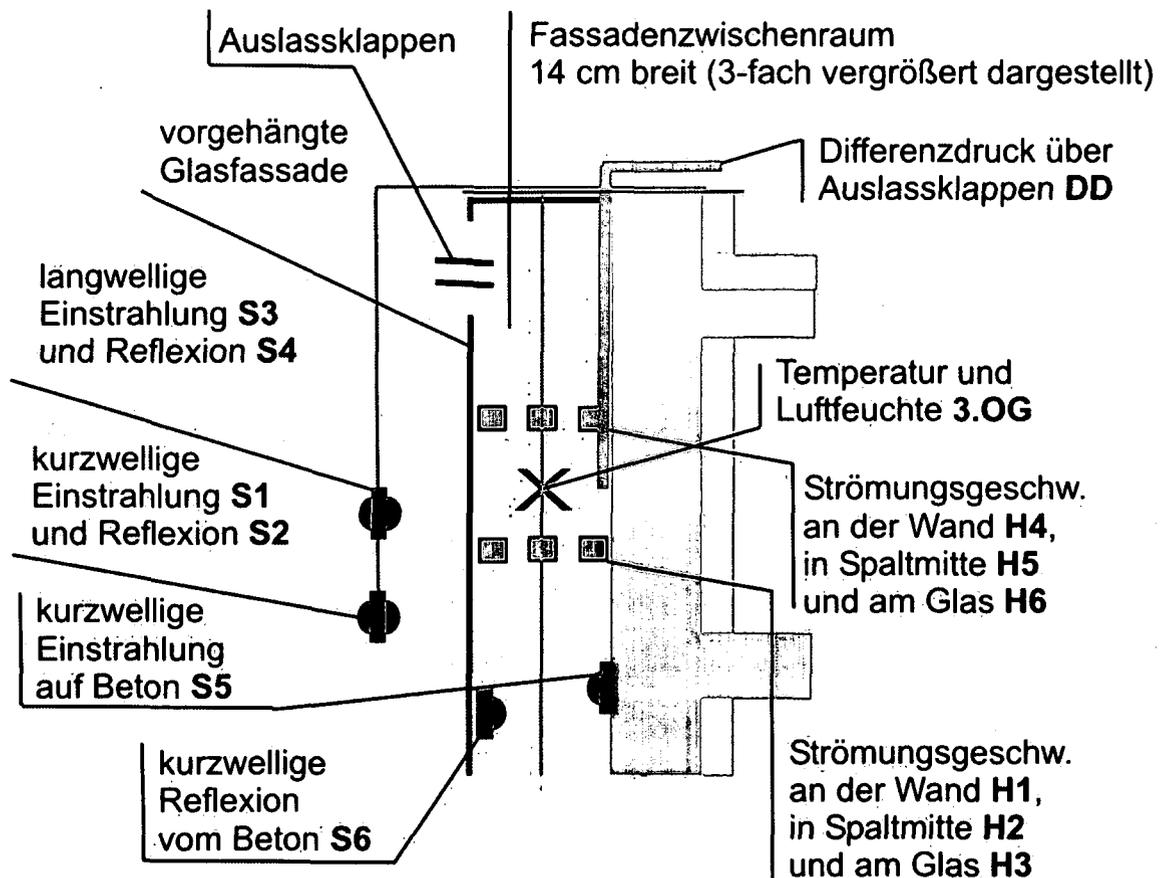


Abb. 30 Detail des Attikabereiches mit den Messstellen

In der Schnittdarstellung des Attikabereiches der Südfassade sind die Messpunkte des Messfalls „Wand“ verzeichnet. Die Betonwand ist 23 cm stark. Die Innendämmung weist laut Plan eine Dicke von 8 cm auf und die Vorsatzschale 2 cm.

In der Abbildung ist die Verteilung der Heizdrähte über die Spaltbreite erkennbar. Vor dem Gebäude befinden sind Messgeräte für den kurz- und den langwelligen Bereich mit Blickrichtung zur und weg von der Fassade. Im Fassadenspalt bestimmt ein kurzwelliger Strahlungsmesser die Einstrahlung auf den Beton und ein weiteres die reflektierten Anteile.

3.3.2.10 Detail Technikraum 1.OG

In der folgenden Abbildung ist der Bereich der Wärmestrommessung mit den einzelnen Messpunkten dargestellt.

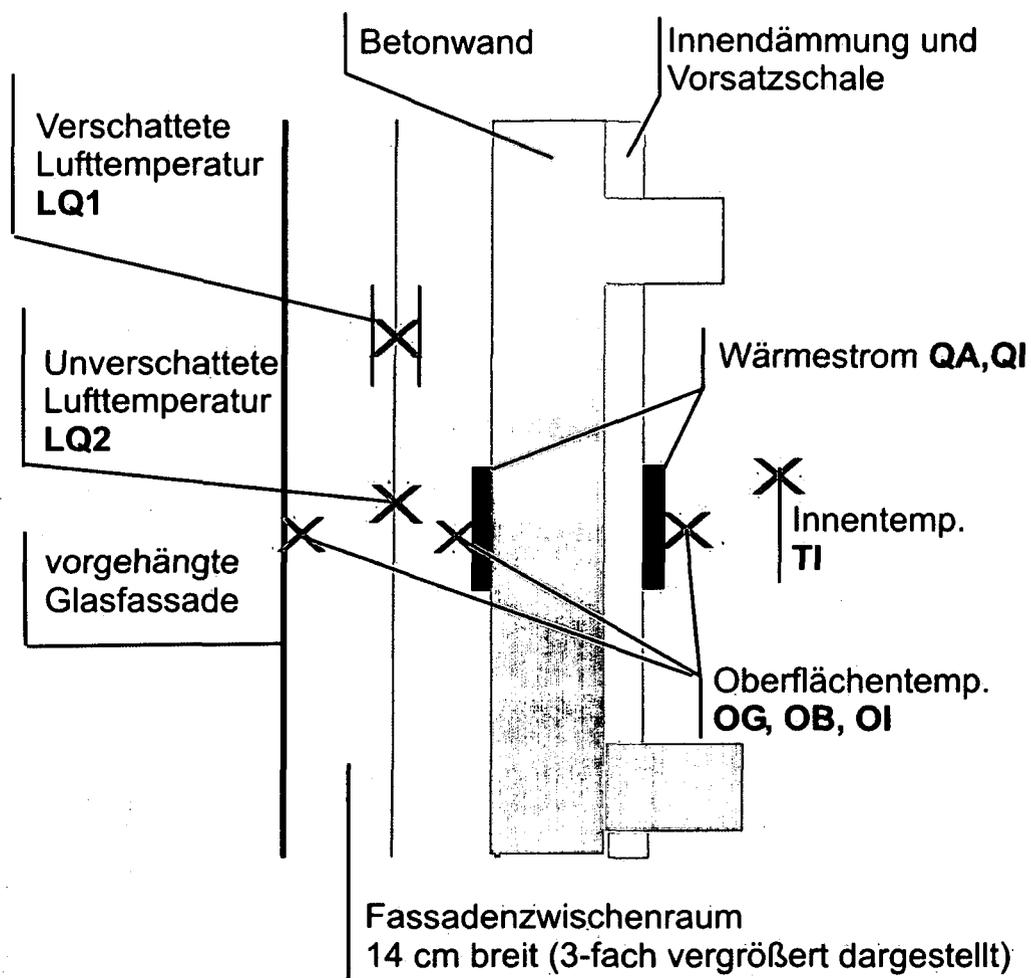


Abb. 31 Detailschnitt mit den Messstellen für Wärmeströme und Temperaturen

Die Messstellen im Inneren waren bei allen Messfällen in Betrieb. Die Sensoren im Fassadenspalt wurden erst im Messfall „Fenster“ ergänzt.

3.4 Sensorik, Datenloggung und Messcomputer

Die eingesetzte Sensorik ist einer entsprechenden Kalibrierung unterzogen worden bzw. ist durch Kalibrierzertifikate nachgewiesen, dass die Messgenauigkeit den Erfordernissen der Messaufgabe entspricht.

Für die Temperaturmessung wurden NTC-Widerstände und Humichip U der Firma Vaisala aus Finnland verwendet. Bei der Feuchtemessung kamen Humitter 50 U und Humichip U jeweils von der Firma Vaisala zum Einsatz.

Die Strömungsgeschwindigkeitsmessung erfolgte mit Hitzdrahtanemometer, Modell 8455-150 der Firma TSI Incorporated, USA. Der eingesetzte Messumformer, Typ PI der Firma Halstup-Walcher GmbH, Deutschland, ist ein pneumatisch-elektronischer Messumformer zur Differenzdruckmessung. Wärmestrommessplatten der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland, wurden verwendet.

Die Pyranometer CM3 und CM11 der Firma Kipp&Zonen, Holland, wurde für den kurzwelligen Strahlungsbereich verwendet. Das Pyrradiometer Typ 8111 der Firma Philipp Schenk GmbH & Co KG dient zur exakten Bestimmung der Strahlungsbilanz im kurz- und langwelligen Strahlungsbereich.

Mit der MAWS Automatic Weather Station, der Firma Vaisala, Helsinki, Finnland, wurde das Klima aufgezeichnet.

Die Datenloggung erfolgt mit dem Digitalmultimeter DMM 2000 und der Erweiterung für die Relaiskarten SWITCH SYSTEM 7001 der Firma Keithley, USA, zum Einlesen der Messwerte. Das Messprogramm wurde mit der Programmiersoftware Testpoint der Firma Keithley erstellt.

3.5 Messergebnisse

Die Messwerte der Woche vom 31. Oktober bis zum 6. November 2001 bilden die Grundlage für die Validierung des im folgenden Abschnitt beschriebenen Simulationsmodells.

Im folgenden Diagramm sind die wichtigsten Messwerte für den Zeitraum vom 31. Oktober 0:00 Uhr bis zum 6. November 24:00 Uhr dargestellt.

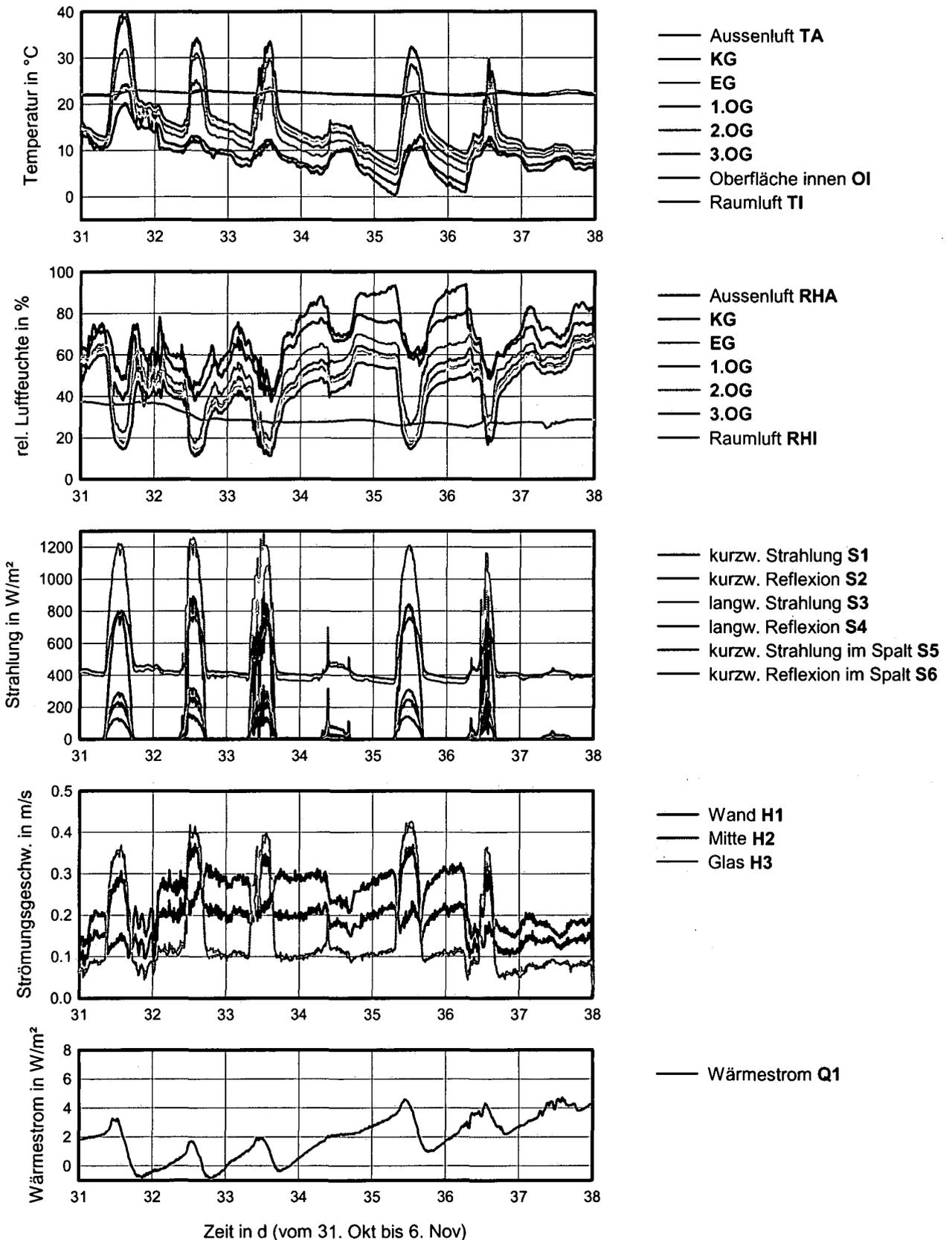


Abb. 32 Messwerte

In der folgenden Darstellung sind die Wetterdaten für den Zeitraum vom 31. Oktober bis zum 6. November dargestellt.

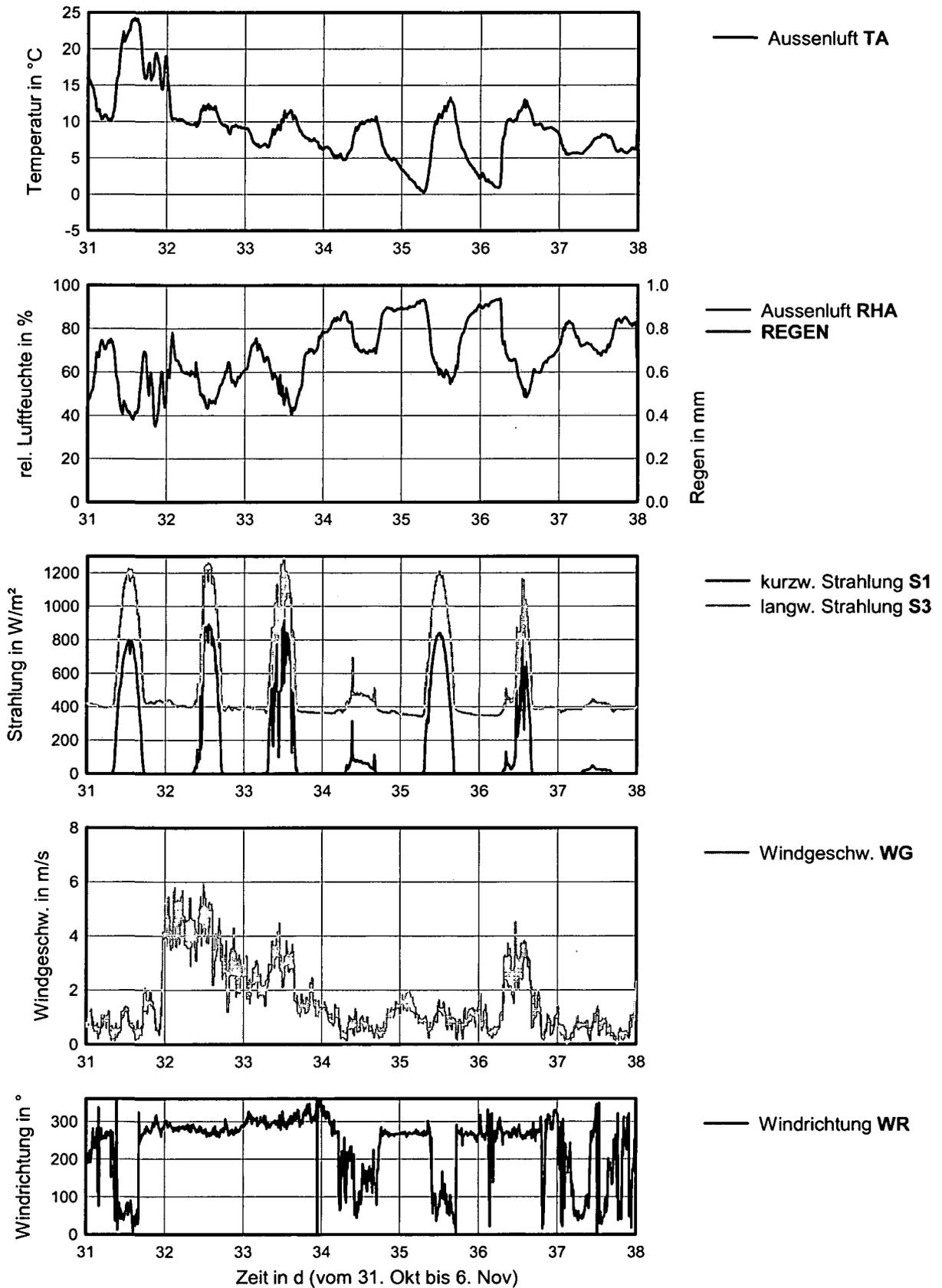


Abb. 33 Wetterdaten

3.6 Simulation

Mit dem Gebäudesimulationsprogramm ESP-r [ESR02] wurden verschiedene Varianten einer Fassadenkonstruktion untersucht, um deren Einfluss auf den Energiehaushalt festzustellen.

Bei der durchgeführten Simulation wird die energetische Auswirkung der Südfassade auf den dahinter liegenden Raum betrachtet, wobei andere Einflüsse auf den Energiehaushalt ausgeschaltet sind. Weiters wird das Verhalten der beim Messobjekt ausgeführten Variante E bei Orientierung nach Norden, Osten und Westen untersucht.

3.6.1 Modellbildung

Das in der Simulation verwendete Modell wurde dem Messobjekt nachgebildet und besteht aus fünf übereinander angeordneten rechteckigen Räumen mit 5 m Breite und 6 m Tiefe. Die Geschosshöhe beträgt 3,50 m. Die drei Innenwände sind aus Stahlbeton, wobei eine raumseitig mit einer Vorsatzschale gedämmt ist.

Die Konstruktion der Südfassade entspricht der Variante F (siehe Punkt 3.6.5). Das Kellergeschoss des Messobjektes ist durch eine 4,5 m hohe und „unendlich“ lange Wand verschattet, die im Abstand von 4 m vor der Südfassade angeordnet ist.

Aus der gewählten Konstruktion ergibt sich eine große Speichermasse und folglich eine große Zeitkonstante. Die Innenwände, der Boden im Kellergeschoss und die Decke im obersten Geschoss sind als symmetrische Systemgrenze definiert. Somit ergibt sich kein Wärmestrom über diese Flächen.

Bei den untersuchten Varianten sind keine internen Gewinne angesetzt und es ist kein Luftwechsel berücksichtigt. In der Fassade sind keine Fenster angeordnet und es gibt keinen Luftaustausch zwischen Fassaden- und Innenraum.

Der Raum wird durch Heizung und Kühlung im Komfortbereich zwischen 20 und 26 °C gehalten. Die Simulationsperiode beträgt ein Jahr. Die Konstruktion wird dem Klima von Wien des Jahres 1997 ausgesetzt und ist unverschattet.

3.6.2 Simulation von Luftströmen mittels Lüftungsnetzwerk

Die auftretenden Luftbewegungen in der Fassade unterliegen zeitlichen Änderungen und sind von den Außenzuständen sowie den Zuständen in den angrenzenden Bauteilen abhängig.

Das Definieren einer konstanten Luftwechselzahl für den Fassadenzwischenraum kann die real auftretenden Verhältnisse im Fassadenzwischenraum nicht zufrieden stellend beschreiben und ist deshalb nicht zielführend. Um den Lufttransport durch die Fassade realitätsnah abzubilden, wird ein Lüftungsnetzwerk erstellt.

Generell wird ein Lüftungsnetzwerk aus Konten aufgebaut, die den Räumen bzw. dem Außenbereich zugeordnet sind. Diese sind miteinander über Öffnungen verbunden, die entsprechend den tatsächlichen Verhältnissen abgebildet werden. An den

externen Knoten sind die Druck- und Temperaturverhältnisse bekannt. Es erfolgt für jeden Zeitschritt die Berechnung der Drücke in den Zonen und die Ströme zwischen den Zonen.

Aus diesen Randbedingungen wird mit Hilfe des Moduls für Lüftungsnetzwerke des Simulationsprogramms ESP-r der Druck an den Innenknoten und der Massenstrom zwischen den Knoten bei jedem Zeitschritt berechnet.

Die folgende Abbildung beinhaltet eine vereinfachte Darstellung des in der Simulation verwendeten Lüftungsnetzwerkes.

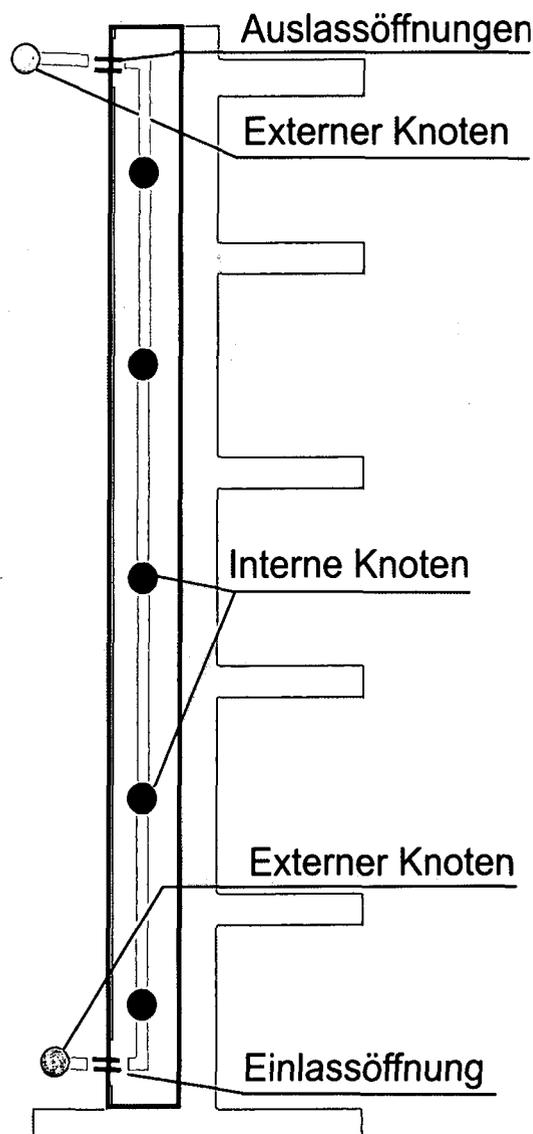


Abb. 34 Lüftungsnetzwerk

3.6.3 Lüftungsöffnungen

Die in der Simulation angesetzten Verbindungsöffnungen zwischen den Zonen sind 0,10 m tief und reichen über die gesamte Fassadenbreite von 5 m. Die Ein- und Auslassklappen der Fassadenkonstruktion werden entsprechend der Jahreszeit gesteuert. Für den geöffneten Zustand im Sommer wird eine Fläche von 0,11 m² und für den geschlossenen Zustand im Winter eine Restfläche von 0,05 m² angesetzt.

Das Simulationsprogramm ESP-r verwendet zur Beschreibung der Strömungseigenschaften über Lüftungsöffnungen folgende Funktion: [HEN91]

$$m = \rho \cdot f(A, \Delta p) \quad (7.)$$

Dabei bedeuten:

- \dot{m} Massenstrom in kg/h
- ρ Dichte der Luft in kg/m³
- A Fläche der Öffnung in m²

3.6.4 Validierung der Simulation mit Messergebnissen

In der Simulation wird eine Wetterdatei, die aus Daten der Messung besteht, verwendet. Die Ergebnisse der Simulation und der Messung für den Wärmestrom und für die Temperaturen im Fassadenspalt werden verglichen.

In der folgenden Abbildung ist der Wärmestrom Q_I an der Innenoberfläche der Außenwand im Technikraum dargestellt. Positive Werte bedeuten, dass Wärme aus dem Innenbereich in die Außenwand fließt und negative Werte deuten auf einen Wärmefluss aus der Wand in den Raum hin.

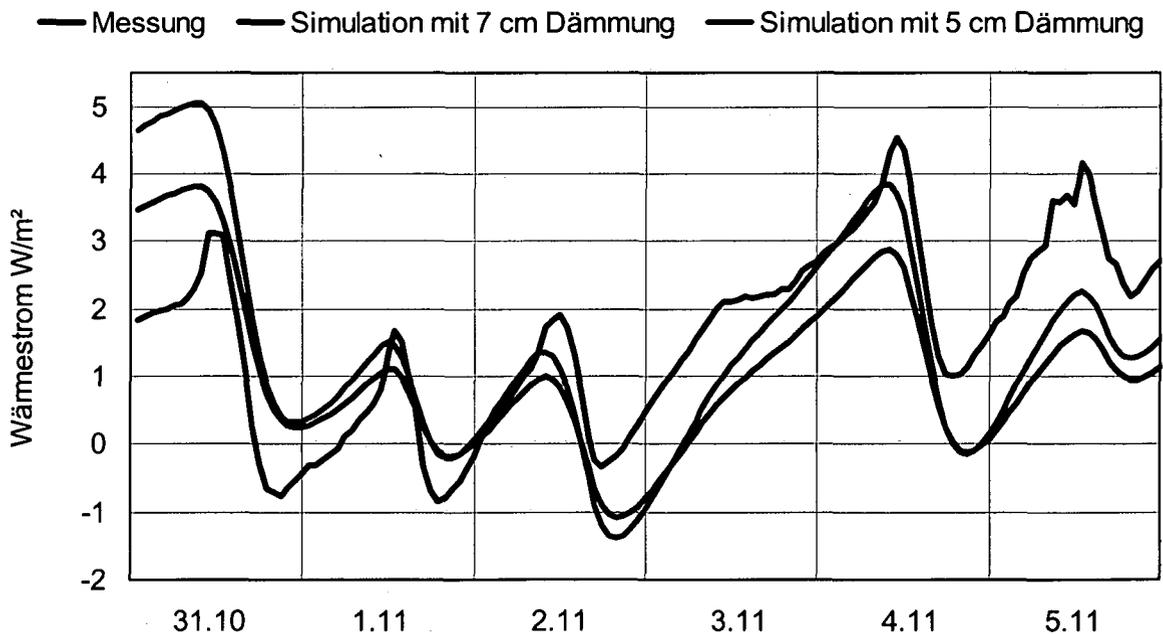


Abb. 35 Wärmeströme Messung und Simulation mit 7 bzw. 5 cm Dämmung an der Wandinnenseite vom 31. Oktober bis zum 5. November 2001

Der gemessene Wärmestrom kann qualitativ durch die Simulation nachgebildet werden. Beim Verwenden der planmäßig vorgesehenen Wärmedämmung von 7 cm an der Innenoberfläche ergeben sich Abweichungen zu den gemessenen Werten.

Da die vorhandene Wandkonstruktion mit Innendämmung zahlreiche Wärmebrücken bedingt, könnte der Wärmestrom mit 5 cm Innendämmung besser nachgebildet werden.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen des Fassadenzwischenraumes im Kellergeschoss und im 3. Obergeschoss aus der Messung und aus der Simulation für die Periode vom 31. Oktober bis zum 5. November 2001 gegeneinander gestellt.

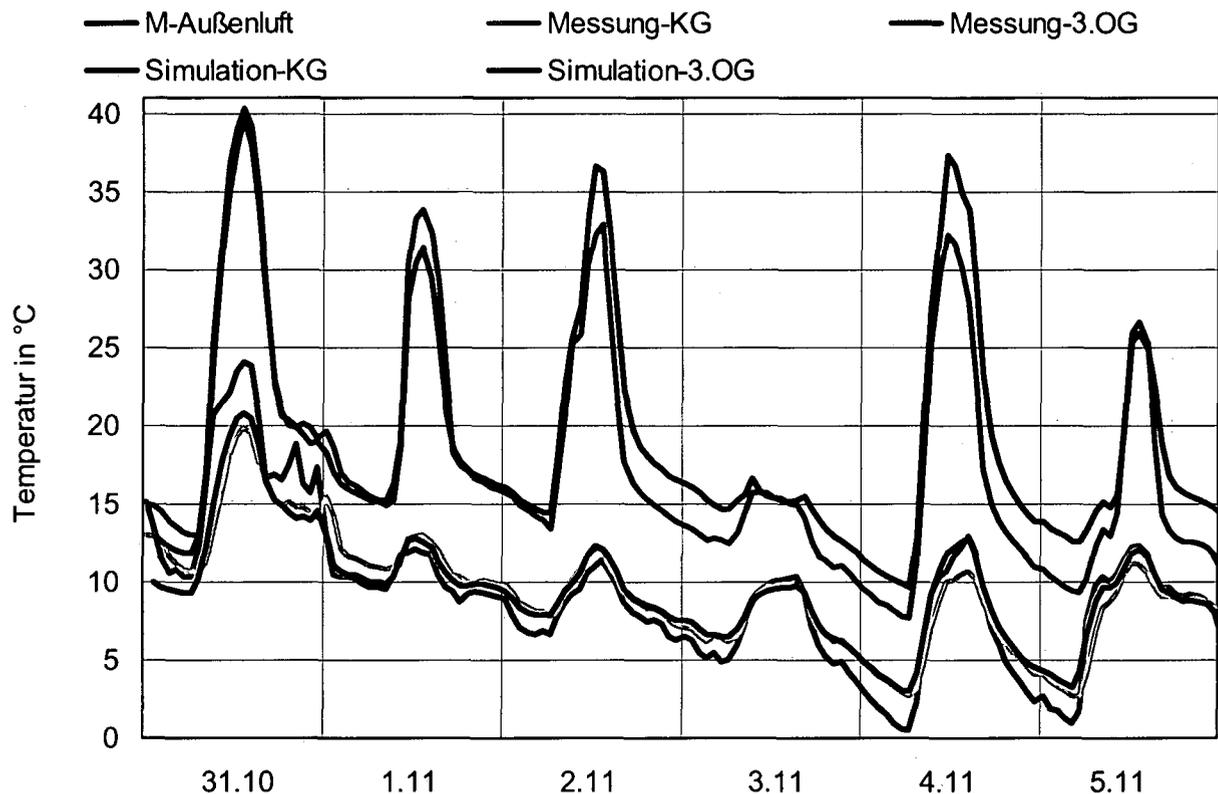


Abb. 36 Verlauf der Temperaturen aus der Messung und aus der Simulation jeweils in Mitte des Kellergeschosses und des 3. Obergeschosses vom 31. Oktober bis zum 5. November 2001

Die Kurven der Temperaturverläufe im 3. Obergeschoss für die Messung und für die Simulation zeigen gute Übereinstimmung. Beim Messprojekt wurde die Vertikalstrahlung ermittelt. Eine bessere Anpassung wäre durch die Messung der Horizontalstrahlung möglich, da diese für das Simulationsprogramm errechnet werden musste.

3.6.4.1 Sensitivitätsanalyse

Es wird die Auswirkung der Ungenauigkeiten in den maßgebenden Eingangswerten der Simulation abgeschätzt.

Die Ungenauigkeit der in der Messung [HDZ02] verwendeten Strahlungsmessinstrumente liegt bei ca. 5%. Die Unsicherheit der Aus- und Einlassklappengrößen wird in der Sensitivitätsanalyse mit 5 % angenommen.

In der folgenden Abbildung ist der maximale und minimale Temperaturverlauf für die Simulationsperiode dargestellt.

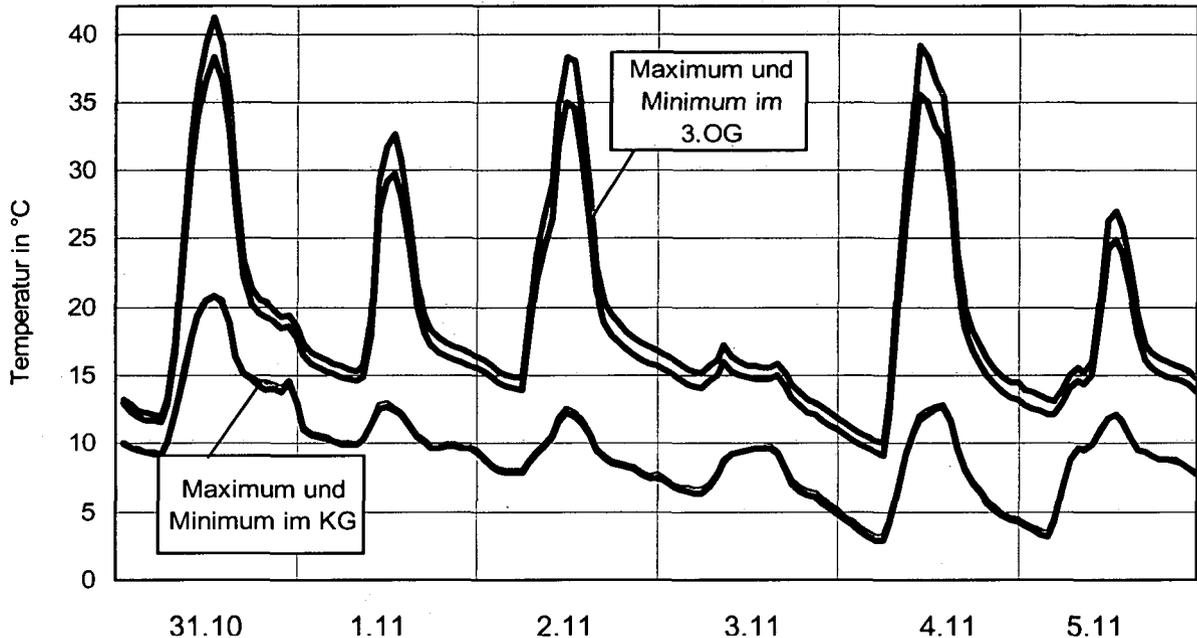
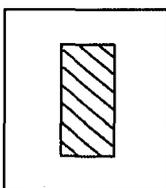


Abb. 37 Maximale und minimale Temperaturverläufe aus der Simulation mit den maximalen und minimalen Eingangswerten in Mitte des Kellergeschosses und des 3. Obergeschosses vom 31. Oktober bis zum 5. November 2001

Die errechneten Temperaturen weichen im 3. Obergeschoss maximal um 3,5 °C voneinander ab. Im Kellergeschoss ist der Unterschied vernachlässigbar gering. Die Ungenauigkeit der Temperatur verursacht durch die Fehler in diesen Eingangswerten ist $\pm 5\%$ des in der Simulation errechneten Wertes.

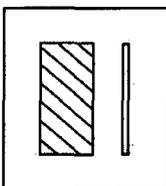
3.6.5 Variationen der Südfassade

Im Folgenden sind sie untersuchten Varianten aufgeführt.



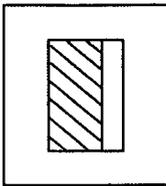
Variante A

Diese Grundkonfiguration beinhaltet die fünf übereinander gestapelten Räume, wobei die Konstruktion der Fassade bei Variante A aus einer 23 cm dicken Stahlbetonwand mit einem U-Wert von 3,60 W/m²K besteht.



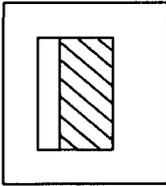
Variante B

Die energetischen Auswirkungen einer im Abstand von 14 cm vorgehängten Einzelscheibe auf die ungedämmte Stahlbetonkonstruktion von Variante A wurden bei Variante B untersucht. Der g-Wert der Verglasung ist 0,5. Die Klappen werden je nach Witterung geschlossen bzw. geöffnet.



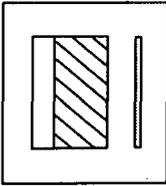
Variante C

Anstatt der Glasfassade wird bei Variante C die Stahlbetonwand mit einem Vollwärmeschutz von 7 cm versehen. Der U-Wert der Konstruktion beträgt $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit wird der Vergleich zwischen Dämmung und vorgehängter Glasfassade ermöglicht.



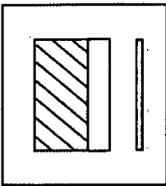
Variante D

Die Konstruktion der Südwand besteht hier aus einer 23 cm starken Stahlbetonwand, die innenseitig mit 7 cm Mineralwolle gedämmt und mit einer Gipskartonplatte verkleidet ist.



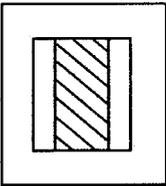
Variante E

Hier wird dem Aufbau von Variante D eine Einfachverglasung mit einem g-Wert von 0,5 vorgehängt.



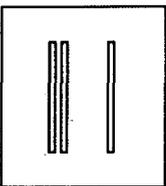
Variante F

Hier wird dem Aufbau von Variante C eine Einfachverglasung mit einem g-Wert von 0,5 vorgehängt.



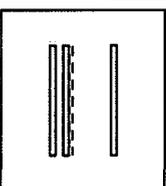
Variante G

Die 23 cm starke Betonwand dieser Variante ist beidseitig mit 7 cm Wärmedämmung versehen. Der U-Wert dieser Fassadenkonstruktion ist $0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$.



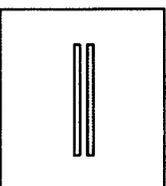
Variante H

Die Konstruktion der Variante H besteht aus einer Isolierverglasung mit einem U-Wert von $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,63. Die vorge-setzte Einfachverglasung hat einen g-Wert von 0,5.



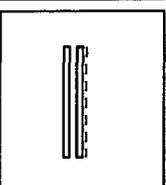
Variante I

Diese Variante ist wie Variante H und besitzt zusätzlich eine Verschattungseinrichtung. Diese wird bei einer Raumtemperatur von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ aktiviert und hat einen Wirkungsgrad von 90%.



Variante J

Die Fassadenkonstruktion in Variante J ist aus einer Isolierglasscheibe mit einem U-Wert von $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,63 aufgebaut.



Variante K

Variante J wird mit einer Verschattungseinrichtung versehen.

3.6.6 Ergebnisse

3.6.6.1 Heiz- und Kühlwärmebedarf

Die südorientierten Fassadenkonstruktionen werden anhand des erforderlichen Heiz- und Kühlwärmebedarfes zur Konditionierung im Komfortbereich von 20 bis 26 °C beurteilt.

In der folgenden Grafik sind die erforderlichen Heiz- und Kühlwärmebedarfswerte der untersuchten Varianten in kWh und bezogen auf die Fassadenfläche von 17,5 m² in kWh/m² dargestellt.

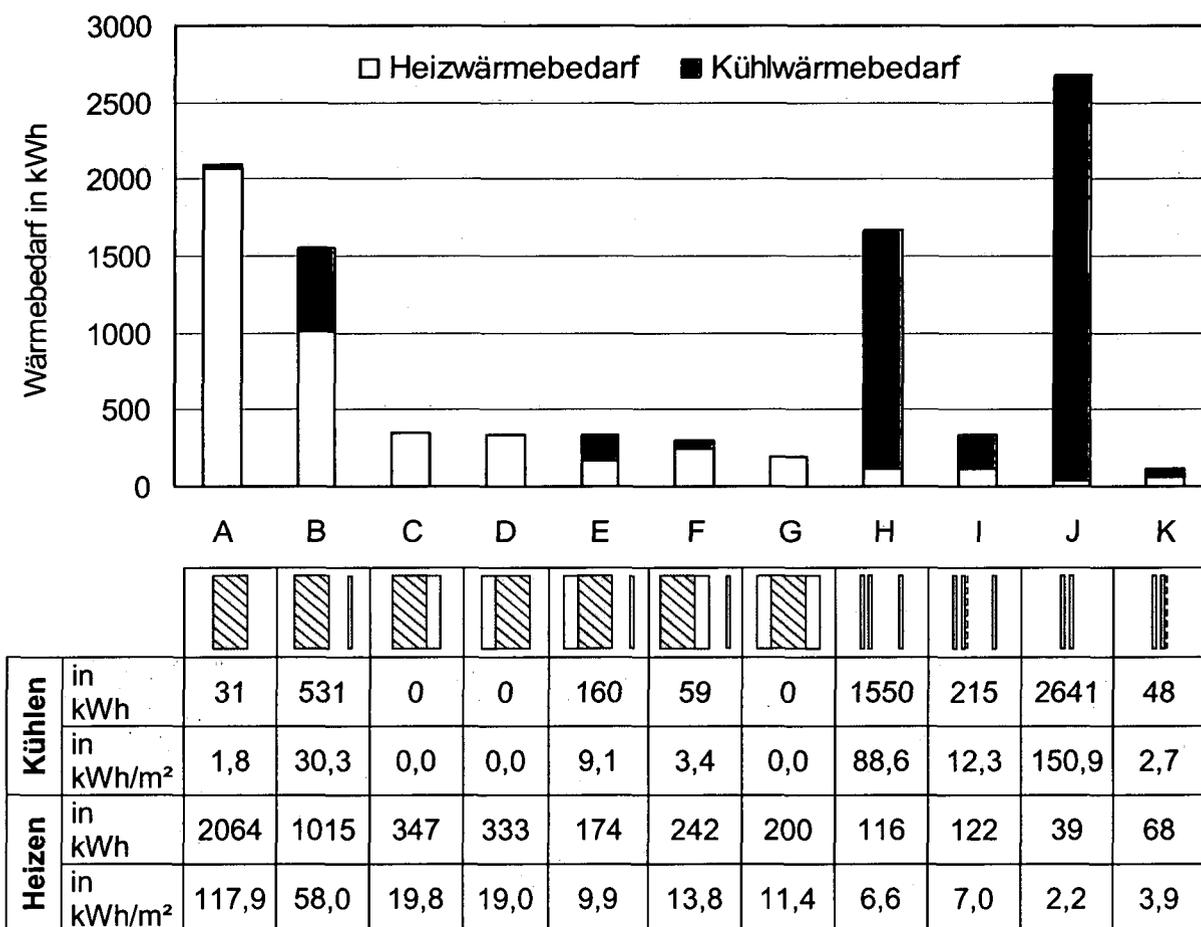


Abb. 38 Heiz- und Kühlwärmebedarf in kWh und in kWh/m² Fassadenfläche

Für die ungedämmte Stahlbetonwand von Variante A ergibt sich der größte Heizwärmebedarf. Durch die Maßnahme in Variante B wird dieser auf 1015 kWh bzw. 58 kWh/m² Fassadenfläche verringert, während der Kühlwärmebedarf auf 531 kWh bzw. 30,3 kWh/m² Fassadenfläche steigt. Das Verwenden einer Glasdoppelfassade in Variante B halbiert den Heizwärmebedarf. Das Aufbringen einer Dämmung, wie in Variante C und D geschehen, ist effektiver und reduziert den Heizwärmebedarf auf ca. 17 %.

Für winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz gleichermaßen positiv wirkt sich die Verbesserung des U-Wertes in den Konfigurationen C, D und G aus. Damit die Raumlufttemperatur dieser Konfigurationen die Komfortgrenze von 26 °C übersteigt,

muss genügend Energie über die Fassade in den Innenraum geleitet werden. Dies ist durch Strahlungsgewinne bzw. eine Außenlufttemperatur, die höher als die Innenlufttemperatur ist, möglich. Der U-Wert dieser Konstruktionen ist gut genug, damit dies während der Simulationsperiode nicht der Fall ist. Somit ergibt sich hier kein Kühlbedarf.

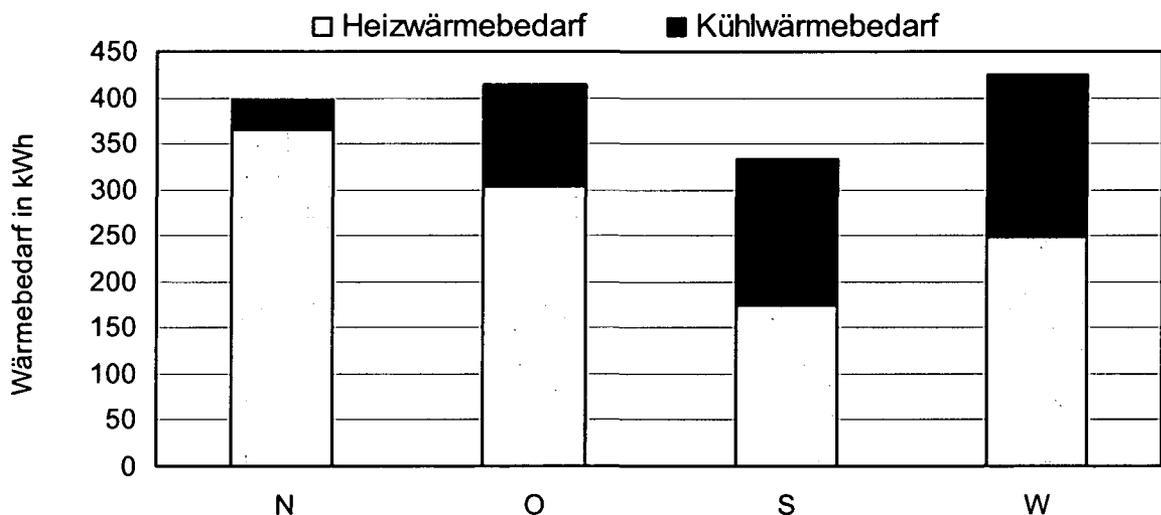
Mit dem Vorsetzen einer Verglasung in Variante E und F ist eine weitere Reduktion des Heizwärmebedarfes möglich. In Variante E mit der Innendämmung werden die Strahlungsgewinne besser genutzt als in Variante F mit der Dämmung zwischen Wand und Verglasung. Folglich ist der Wärmebedarf für Heizen niedriger und für Kühlen höher als in Variante F. Variante G, die anstatt der Glasdoppelfassade der Variante E und F eine Dämmung aufweist, ist übers Jahr gesehen am besten.

In den transparenten Konstruktionen der Varianten H, I, J und K werden die niedrigsten Werte für den Heizwärmebedarf erreicht. Aufgrund des g-Wertes der vorgehängten Einfachverglasung liegen die Werte für Variante H und I über den Vergleichsvarianten J und K. Aus dem Kühlwärmebedarf der transparenten Varianten ist ersichtlich, dass eine Verschattung unverzichtbar ist.

3.6.6.2 Heiz- und Kühlwärmebedarf der Variante E nach Himmelsrichtungen

Um die Auswirkung der Orientierung abzuschätzen, wird die Südfassade der Variante E nach Norden, Osten und Westen ausgerichtet.

In der folgenden Grafik sind die erforderlichen Heiz- und Kühlwärmebedarfswerte in kWh und bezogen auf die Fassadenfläche von 17,5 m² in kWh/m² der Variante E mit Orientierung nach Norden, Osten, Süden und Westen dargestellt.



Kühlen	in kWh	32	110	160	175
	kWh/m ²	1,8	6,3	9,1	10,0
Heizen	in kWh	365	303	174	248
	kWh/m ²	20,9	17,3	9,9	14,2

Abb. 39 Heiz- und Kühlwärmebedarf in kWh der Variante E mit Orientierung nach Norden, Osten, Süden und Westen

Ausgehend von der Südvariante steigt der Heizwärmebedarf bei Orientierung nach Westen um ca. 45 %, nach Osten um ca. 74 % und nach Norden um ca. 110 %. Der Wärmebedarf zum Kühlen steigt für die Westfassade um etwa 9 %. Die Ostfassade liegt bei 69 % der Südfassade und die Nordfassade bei 20 %.

3.6.6.3 Effektiver U-Wert

Für die Simulationsperiode wurden monatsweise effektive U-Werte errechnet, die den Energieeintrag durch die Strahlung berücksichtigen. Diese ergeben sich aus der über die Fassadenfläche fließenden Wärmemenge geteilt durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen.

Für die Fassadenkonstruktionen der Varianten A, D, E und K sind die effektiven U-Werte in der folgenden Abbildung dargestellt.

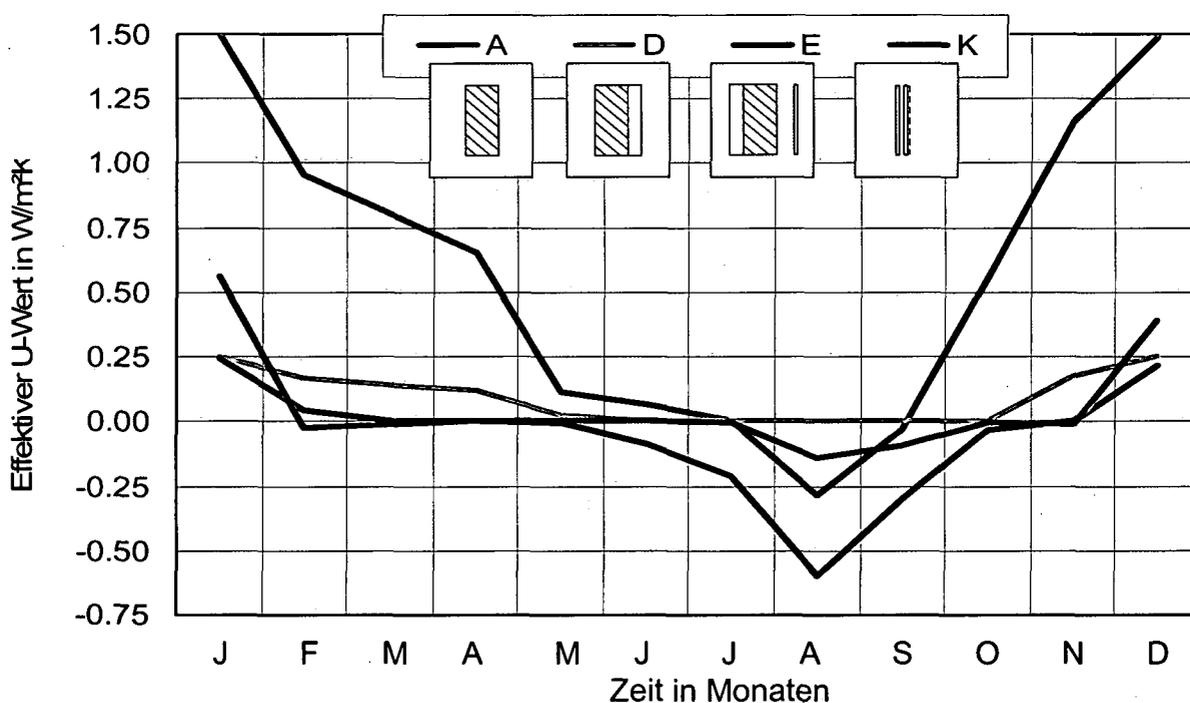


Abb. 40 Effektiver U-Wert der Varianten A, D, E und K

Umso weniger die Kurve des effektiven U-Wertes von Null abweicht, umso weniger Energie fließt über die Fassadenfläche, was für den Winter- und den Sommerfall positiv ist.

In Variante A geht in den kalten Monaten die meiste Wärme nach außen verloren. Im Januar liegt der effektive U-Wert von Variante A bei ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nimmt die Strahlungsintensität zu, sinkt der Wärmedurchgangskoeffizient. In den Monaten August und September ergibt sich ein Wärmefluss ins Rauminnere, was am negativen Vorzeichen des effektiven U-Wertes zu erkennen ist.

In der Simulation wurde für Variante D ein effektiver Wärmedurchgangskoeffizient von $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ im Januar ermittelt. Die Werte der folgenden Monate sinken mit zunehmender Sonneneinstrahlung und erreichen im Sommer $0,00 \text{ W/m}^2\text{K}$, das heißt

Kühlen ist nicht erforderlich. Während in Variante D keine negativen Werte auftreten, ergeben sich für Variante E nennenswerte Wärmedurchgangszahlen in den Innenraum von bis zu ca. $-0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Bei Variante K treten nur im Dezember ($0,39 \text{ W/m}^2\text{K}$) und Januar ($0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$) Verluste auf. Die Energieflüsse in den Innenraum sind durch das Abhalten von Sonnenstrahlung mit einer außenliegenden Jalousie auf maximal $-0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ im August beschränkt. Im Januar ergibt sich für die Varianten D und E ein effektiver Wärmedurchgangskoeffizient von jeweils ca. $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der effektive U-Wert der Wandkonstruktion wird also durch die zusätzliche Glasscheibe nicht beeinflusst.

3.6.6.4 Investitionskosten

In Bezug auf Investitionskosten und weiteren Kosten für Wartung, Reinigung etc. wird auf [GER99] verwiesen. Dort wird aufgezeigt, dass Glasdoppelfassaden mit wesentlich höheren Aufwendungen als konventionelle Fassadensysteme belastet sind. Die Investitionskosten liegen für Wärmedämmverbundsysteme je nach Dicke und Schwierigkeit der Anschlussdetails bei ca. 70 bis 150 €/m^2 Fassade. Bei Glasdoppelfassaden werden in [OES97] Mehrkosten von Glasdoppelfassaden mit einem Schwankungsbereich von 150 bis 400 €/m^2 Fassadenfläche angegeben.

Die Investitionskosten der energetisch etwa gleichwertigen Ausführungsvarianten E bzw. F mit vorgesetzten Glasscheiben sind im Vergleich zu Variante G mit zusätzlicher Dämmung bei Verwendung der oben genannten Richtwerte mindestens um den Faktor zwei teurer. Transparente Konstruktionen sind ohne eine zusätzliche Vorsatzschale am günstigsten, sofern ein ausreichender Sonnenschutz gewährleistet wird.

3.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel wurde das wärmetechnische Verhalten verschiedener Fassadenkonstruktionen mit einem Simulationsmodell untersucht. Das Strömungsmodell des Fassadenzwischenraumes wurde anhand einer Messung an einem Gebäude mit einer Glasdoppelfassade validiert.

Im Zuge der Untersuchung wurden verschiedene Wandkonstruktionen mit bzw. ohne Glasdoppelfassade simuliert. Das komplexe Zusammenwirken der Temperaturerhöhung im Fassadenzwischenraum, die Veränderung des Strahlungsdurchganges und das thermische Verhalten eines Gebäudes kann mittels der durchgeführten Simulationen abgebildet werden.

Die Glasdoppelfassade ist beim Vergleich der Investitionskosten und der Aufwendungen für Heizen und Kühlen der herkömmlichen gedämmten Fassade unterlegen. Aus energetischen Gründen ist die Installation einer Glasdoppelfassade nicht empfehlenswert. Durch Glasdoppelfassaden erzielbare Verbesserungen beim Sonnenschutz (z.B. von Hochhäusern), bei der natürlichen Belüftung, beim Schallschutz etc. waren nicht Gegenstand der durchgeführten Simulationen.

Aufgrund der energetischen und finanziellen Nachteile sind Glasdoppelfassaden keine Alternative zur in Kapitel 2 verwendeten herkömmlichen Fassadendämmung des mehrgeschossigen Passivhauses.

4 Hygienischer Tauglichkeitsnachweis von Lüftungsanlagen in Gebäuden in Passivbauweise

4.1 Einleitung

In Kapitel 4, dem zweiten Hauptabschnitt der vorliegenden Dissertation, wird eine Methode zum Nachweis der hygienischen Tauglichkeit von Lüftungsanlagen in Passivhäusern erarbeitet. Insbesondere werden die thermisch-hygrischen Zustände in den Zuluftfiltern der haustechnischen Anlage untersucht, um die hygienische Zuverlässigkeit der Lüftungsanlage beurteilen zu können.

Die Kriterien zur Beurteilung im Hinblick auf die hygienische Zuverlässigkeit sind die Oberflächentemperaturen und die Luftfeuchtigkeit an den Zuluftfiltern. Die Ergebnisse der Simulation sollen die in Kapitel 1 aufgelisteten Anforderungen nach VDI 6022 für die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter erfüllen, um die hygienische Einwandfreiheit der Anlage zu garantieren.

Diese Methode wird beispielhaft am Passivhaus Utendorfgasse, das nach der in Kapitel 2 beschriebenen Methode optimiert wurde, angewandt.

4.2 Anlagenmodell in Simulink

Die thermischen und hygrischen Verhältnisse im Innenraum und in allen Bauteilen der Lüftungsanlage wurde mit einem dynamischen Simulationsmodell berechnet. Dieses Modell wurde mit dem Programm Matlab und dem Programmaufsatz Simulink [MAT01] erstellt.

Die verwendete Programmumgebung wurde speziell für die Simulation von dynamischen Systemen entwickelt. Simulink bieten die Möglichkeit Funktionsblöcke aus Bibliotheken in einem graphischen Fenster zu einem Modell zu verknüpft. Funktionsblöcke können auch erweitert bzw. neue definieren werden. Im folgenden Abschnitt sind beispielhaft die in Simulink graphisch umgesetzten Bilanzgleichungen für den Energie- und Feuchtehaushalt dargestellt.

Das Modell des Gebäudes und der Lüftungsanlage wurde aus Subsystemen aufgebaut, in denen die Bilanzgleichungen des Energie-, Feuchte-, und Lufthaushaltes gelöst werden. Es wurden Berechnungssysteme für die Zonen, die Bauteile (Wände, Decken, Türen und Fenster), die Lüftungsverbindungen wie Fenster und Türen und die Lüftungsanlage erstellt.

In der folgenden Abbildung ist das in Simulink erstellte Anlagenmodell, das sich aus Subsystemen zusammensetzt, dargestellt.

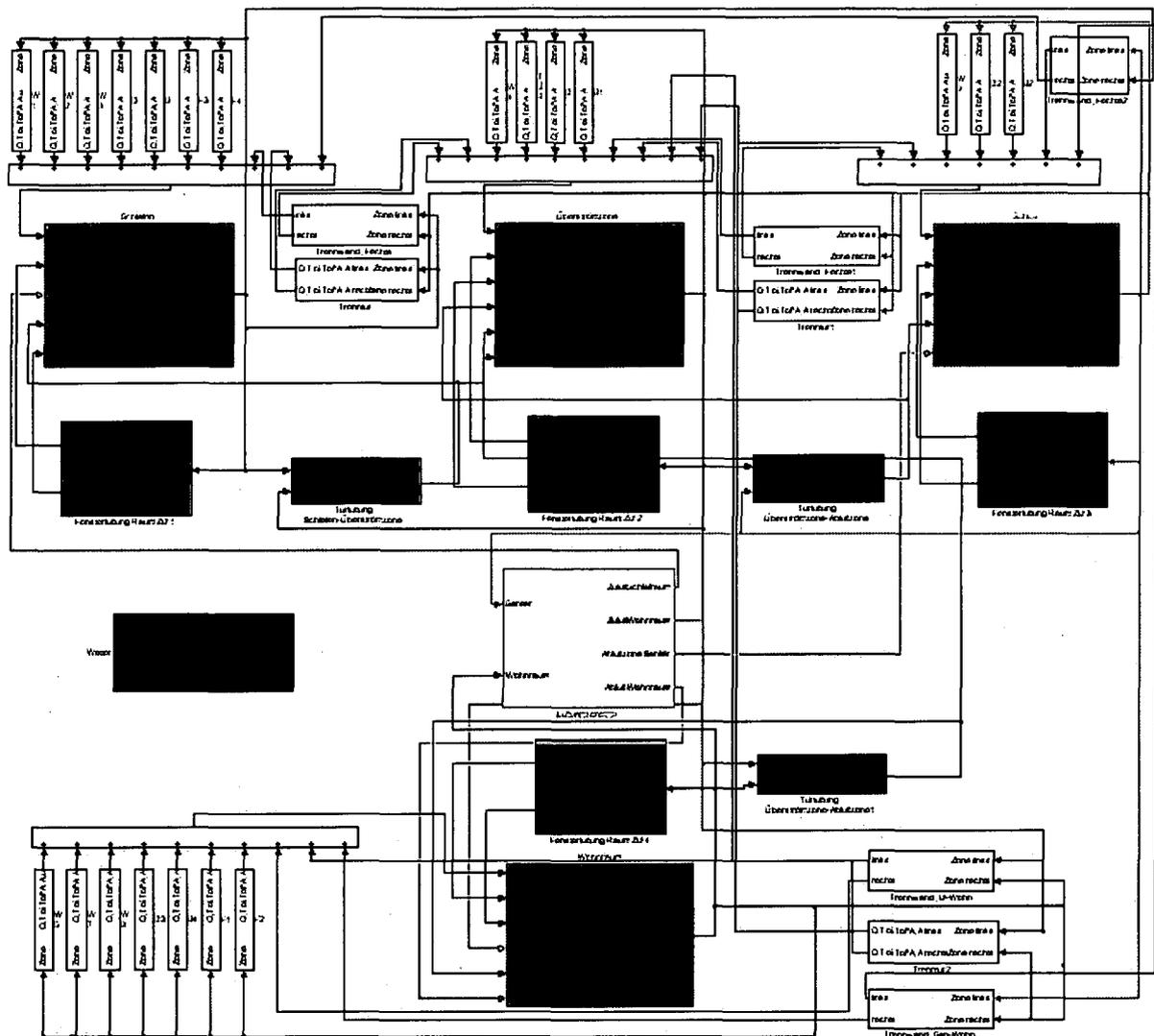


Abb. 41 Anlagenmodell in Simulink

In der vorstehenden Abbildung sind die Subsysteme für die Zonen rot, für die Lüftungsanlage orange, für die Bauteile farblos und für das Wetter blau dargestellt. Die Subsysteme für die Berechnung des Lufttransportes zwischen den einzelnen Zonen und zwischen den Zonen und Außen sind grün hinterlegt.

Über die Verbindungen zwischen den Subsystemen werden an jedem Zeitschritt die notwendigen Informationen über den Energie-, Feuchte-, und Lufttransport zwischen den Subsystemen ausgetauscht.

In den Subsystemen werden die im Folgenden aufgelisteten Bilanzgleichungen für den Energie-, Feuchte-, und Lufthaushalte gelöst.

4.2.1 Zonen

Die Bilanzgleichungen der Zonen für die Temperatur, den Luftdruck und den Wasserdampfpartialdruck berücksichtigen die wesentlichen Zu- bzw. Abflüsse in die bzw. aus den Zonen.

4.2.1.1 Energetische Bilanzgleichung

Die Lufttemperatur in einer Zone wurde anhand der folgenden Bilanzgleichung berechnet.

$$\dot{T}_a \cdot C_a = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i \cdot (T_{o,i} - T_a) + \sum_{j=1}^o c_a \cdot \rho_a \cdot g_{zu,j} \cdot T_{zu,j} - \sum_{k=1}^p c_a \cdot \rho_a \cdot g_{ab,k} \cdot T_{ab,k} + \dot{Q} \quad (8.)$$

Dabei bedeuten:

- \dot{T}_a Änderung der Lufttemperatur der Zone in K/s
- C_a Kapazität der Luft in J/K, berechnet aus $C_a = c_a \cdot \rho_a \cdot V$
- c_a spezifische Wärmekapazität der Luft in J/kgK
- ρ_a Dichte der Luft in kg/m³
- V Volumen der Zone
- α_i Übergangswiderstand der Fläche i in W/K
- A_i Fläche i in m²
- $T_{o,i}$ Temperatur der Oberflächen i in °C
- T_a Lufttemperatur der Zone in °C
- $g_{zu,j}$ Luftmassenstrom j in die Zone in kg/s
- $T_{zu,j}$ Temperatur des Zuluftmassenstroms j in °C
- $g_{ab,k}$ Luftmassenstrom k aus der Zone in kg/s
- $T_{ab,k}$ Temperatur des Abluftmassenstroms k in °C
- \dot{Q} konvektive interne Wärmegewinne in W

Die folgenden Gleichungen werden zur Berechnung der empfundenen Temperatur und der mittleren Strahlungstemperatur verwendet.

$$T_{res} = \frac{T_{rad} + T_a}{2} \quad (9.)$$

$$T_{rad} = \sum_{j=1}^o \frac{A_j \cdot T_{o,j}}{A_i} + Q_{rad} \quad (10.)$$

Dabei bedeuten:

- T_{res} resultierende oder empfundene Temperatur in der Zone in °C
- T_{rad} mittlere Strahlungstemperatur in der Zone in °C
- A_i Oberfläche i in m²

$T_{o,i}$ Temperatur der Oberflächen i in $^{\circ}\text{C}$
 Q_{rad} Strahlungswärme in W

In der folgenden Abbildung ist die Umsetzung der energetischen Bilanzgleichung in Simulink dargestellt.

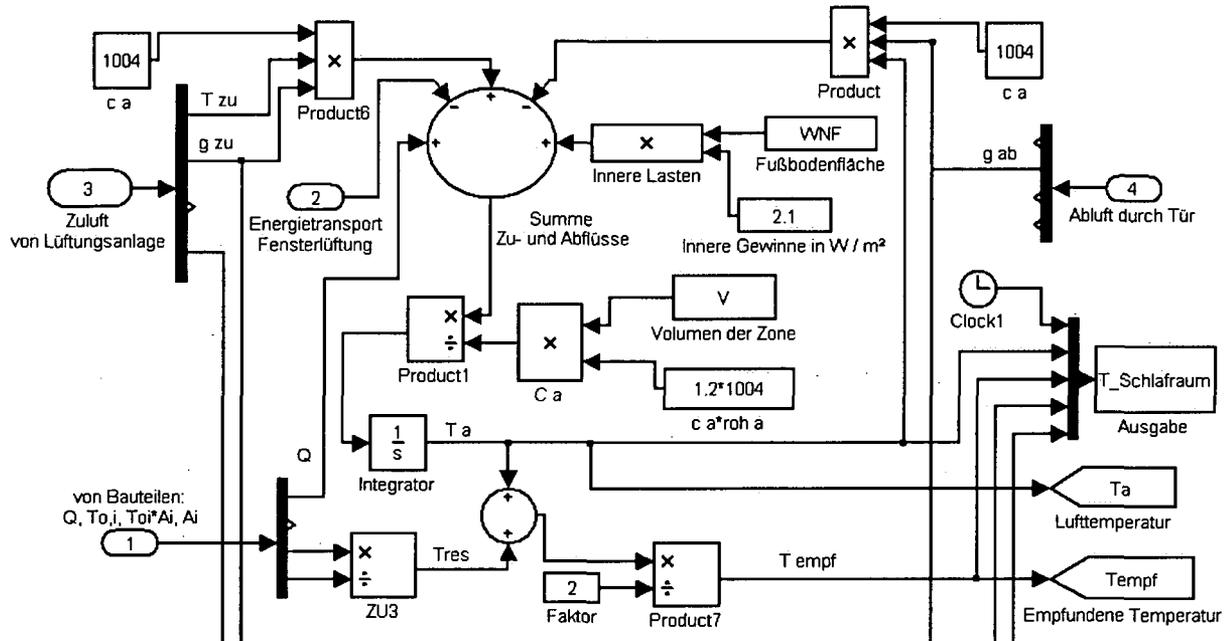


Abb. 42 Umsetzung der energetischen Bilanzgleichung in Simulink

Im Funktionsblock „Summen Zu- und Abflüsse“ werden die Flüsse in bzw. aus der Zone entsprechen der rechten Seite der energetischen Bilanzgleichung (8.) summiert. Nach der Division durch die Kapazität der Luft C_a erfolgt die Integration der Lufttemperatur T_a .

4.2.1.2 Bilanzgleichung für die Luftmasse

Der Luftdruck in einer Zone wurde nach der folgenden Bilanzgleichung errechnet.

$$\dot{p} * C = \sum_{j=1}^o g_{zu,j} - \sum_{k=1}^p g_{ab,k} \tag{11.}$$

Dabei bedeuten:

- \dot{p} Änderung des Luftdruckes in der Zone in Pa/s
- C Kapazität der Luft in kg/Pa , berechnet aus $C_v = \frac{V}{R \cdot T_a}$
- V Volumen der Zone
- R Gaskonstante für Wasser in J/kgK
- T_a Lufttemperatur der Zone in K
- $g_{zu,j}$ Luftmassenstrom j in die Zone in kg/s
- $g_{ab,k}$ Luftmassenstrom k aus der Zone in kg/s

4.2.1.3 Bilanzgleichung für die Luftfeuchtigkeit

Zur Berechnung des Wasserdampfpartialdruckes einer Zone wurde folgende Bilanzgleichung verwendet.

$$\dot{p}_v \cdot C_v = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot A_i \cdot (p_{o,i} - p_v) + \sum_{j=1}^o \frac{g_{zu,j} \cdot u_{zu,j}}{\rho_{zu,j}} - \sum_{k=1}^p \frac{g_{ab,k} \cdot u_{ab,k}}{\rho_{ab,k}} + \dot{M} \quad (12.)$$

Dabei bedeuten:

- \dot{p}_v Änderung des Wasserdampfpartialdruckes der Zone in Pa/s
- C_v Kapazität der Luft in kg/Pa, berechnet aus $C_v = \frac{V}{R \cdot T_a}$
- V Volumen der Zone in m^3
- R Gaskonstante für Wasser = 462 J/kgK
- T_a Lufttemperatur der Zone in K
- β_i technischer Feuchteübergangswiderstand der Fläche i in $kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$
- A_i Fläche i in m^2
- $p_{o,i}$ Wasserdampfpartialdruck der Oberflächen i in Pa
- p_v Wasserdampfpartialdruck der Zone in Pa
- $g_{zu,j}$ Luftmassenstrom j in die Zone in kg/s
- $u_{zu,j}$ Wasserdampfkonzentration des Zuluftmassenstroms j in kg/m^3
- $\rho_{zu,j}$ Luftdichte des Luftmassenstromes j aus der Zone in kg/s
- $g_{ab,k}$ Luftmassenstrom k aus der Zone in kg/s
- $u_{ab,k}$ Wasserdampfkonzentration des Abluftmassenstroms k in kg/m^3
- $\rho_{ab,k}$ Luftdichte des Luftmassenstromes j aus der Zone in kg/s
- \dot{M} interne Feuchteproduktion in kg/s

In der folgenden Abbildung ist die Umsetzung der Bilanzgleichung für die Luftfeuchtigkeit in Simulink dargestellt.

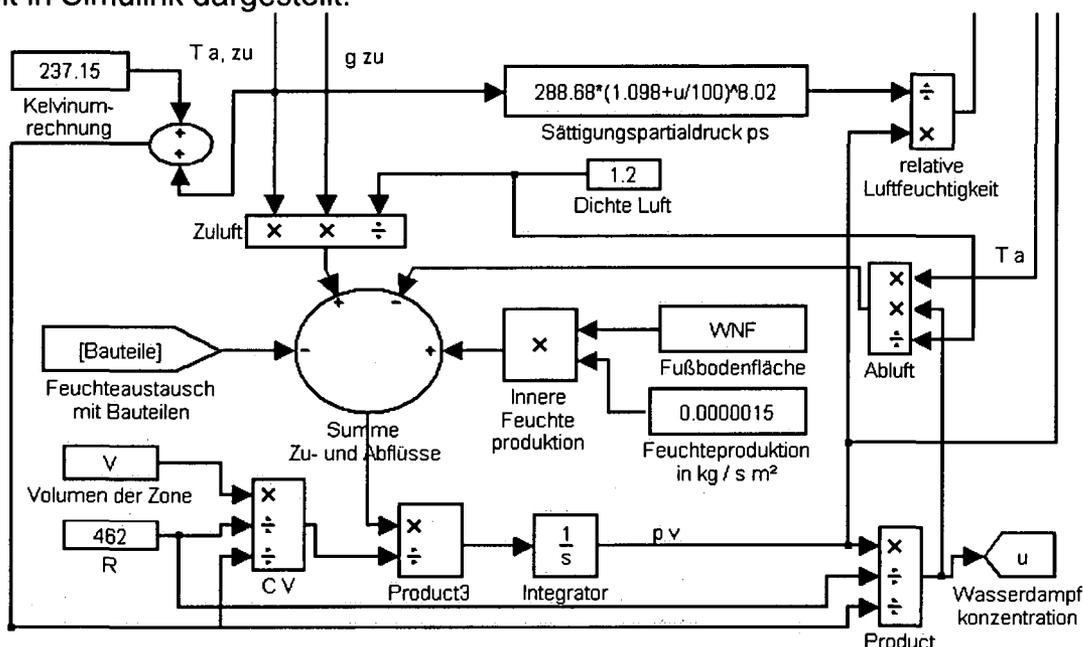


Abb. 43 Umsetzung der Bilanzgleichung für die Luftfeuchtigkeit in Simulink

Im Funktionsblock „Summe der Zu- und Abflüsse“ werden die Flüsse in bzw. aus der Zone entsprechen der rechten Seite der Bilanzgleichung für die Luftfeuchtigkeit (12.) summiert. Nach der Division durch die Kapazität der Luft C_a erfolgt die Integration des Wasserdampfpartialdrucks p_v .

4.2.2 Bauteile

Die Bilanzgleichungen werden numerisch mit der Finiten Volumen Methode gelöst. Die Bauteile werden zur Berechnung in Schichten unterteilt, in denen lokal stationäre Verhältnisse angenommen werden. Aus Genauigkeitsgründen ist für die Berechnung die Obergrenze der Schichtdicke des Temperatursystems wird mit ca. 10 cm beschränkt. Da der Feuchtetransport mit größerer Trägheit stattfindet als der Wärmetransport, wird die Berechnung des Feuchtgehaltes in dünneren Schichten durchgeführt. Jeder Temperaturschicht werden fünf Feuchteschichten zugeordnet. Diese Maßnahme gewährleistet die korrekte Berechnung der beiden direkt zusammenhängenden Kenngrößen.

4.2.2.1 Wärmeleitung [HAG01]

Die Berechnung der Wärmeleitung in den Bauteilen erfolgt nach „Thermal System Analysis using the Building Physics Toolbox in Simulink“ von C. E. Hagentoft.

Als Eingangsgrößen für eine Schicht des Systems zur Berechnung des Energiehaushalts werden Daten aus dem vorgehenden und dem nachfolgenden System benötigt. Die Materialschicht an der Oberfläche erhält Information über Temperatur und Wärmeübergangskoeffizient von der angrenzenden Zone und von der folgenden Materialschicht. Die folgenden Materialschichten sind analog angeschlossen.

Die gekoppelte Berechnung des Wärme- und Feuchtehaushalts der die Zonen umschließenden Bauteile findet in Subsystemen statt. In der folgenden Abbildung ist das System eines Bauteils schematisch dargestellt.

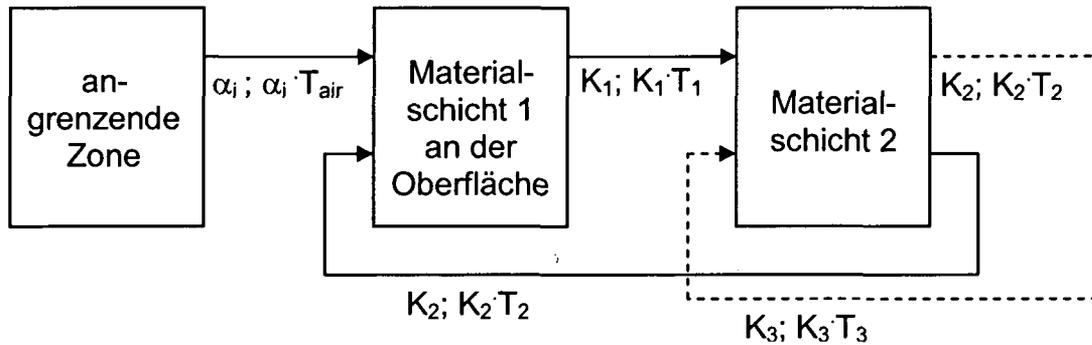


Abb. 44 Schema des Berechnungsablaufes für einen Wandaufbau

Über die Verbindungen zwischen den Materialschichten werden die Wärmeleitfähigkeit und das Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Temperatur weitergegeben.

4.2.2.1.1 Bilanzgleichung

Zur Berechnung der Temperaturen wird jeder Schicht im numerischen Bauteilmodell ein massebehafteter Knoten zugeordnet.

In der folgenden Abbildung ist das numerische Modell von mehreren Materialschichten und von der Ankopplung an die angrenzende Zone dargestellt.

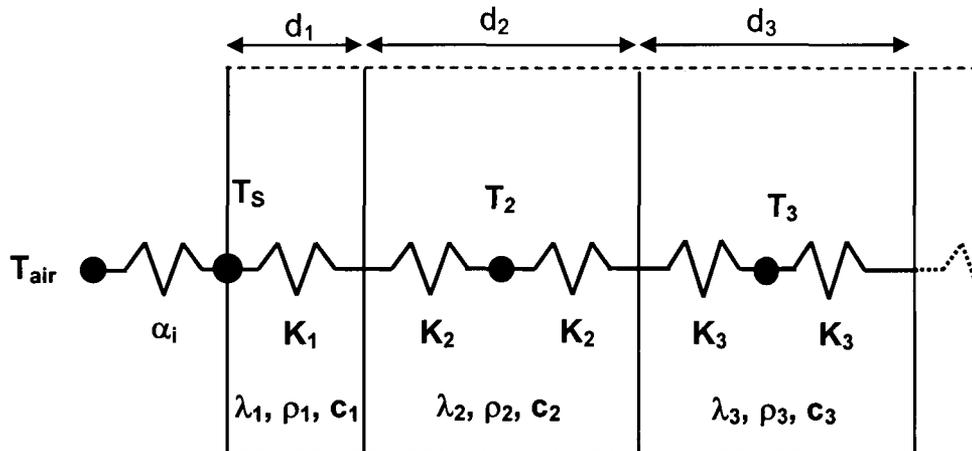


Abb. 45 Numerisches Modell der Materialschichten einer Wand

Unter Annahme von lokal stationären Bedingungen ergibt sich die folgende Bilanzgleichung für die Temperatur eines Materialknotens.

$$C_i \cdot \dot{T}_i = K_i \cdot (T_{s,i-1,i} - T_i) - K_i \cdot (T_i - T_{s,i,i+1}) \quad (13.)$$

Dabei bedeuten:

- C_i Wärmekapazität der Materialschicht i in J/Km²
- T_i Knotentemperatur der Materialschicht i in °C
- K_i Wärmeleitfähigkeit einer Materialschicht in W/Km²
- $T_{s,i-1,i}$ Temperatur an der Schichtengrenze von Schicht i-1 und Schicht i in °C

Die Kapazität C einer Schicht wird wie folgt berechnet.

$$C_i = c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \quad (14.)$$

Dabei bedeuten:

- c_i spezifische Wärmekapazität des Baustoffes i in J/kgK
- ρ_i Dichte des Baustoffes i in kg/m³
- d_i Dicke der Schicht i

Die Wärmeleitfähigkeit für einen Knoten im Bauteil errechnet sich aus der nächsten Gleichung.

$$K_i = \frac{\lambda_i}{d_i / 2} \quad (15.)$$

Die Wärmeleitfähigkeit für einen Knoten an der Bauteiloberfläche errechnet sich aus der folgenden Gleichung.

$$K_j = \frac{\lambda_j}{d_j} \quad (16.)$$

Dabei bedeuten:

- λ Kapazität einer Materialschicht in W/mK
- d Dicke einer Schicht

Die Grenzschichttemperatur ergibt sich nach der folgenden Formel.

$$T_{s,i-1,i} = \frac{K_{i-1} \cdot T_{i-1} + K_i \cdot T_i}{K_{i-1} + K_i} \quad (17.)$$

Die Knotentemperatur für einen Knoten im Bauteilinneren ergibt sich aus der Bilanzgleichung nach Einsetzen der Grenzschichttemperaturen.

$$C \cdot \dot{T}_i = \frac{K_{i-1} \cdot K_i}{K_{i-1} + K_i} (T_{i-1} - T_i) - \frac{K_i \cdot K_{i+1}}{K_i + K_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) \quad (18.)$$

Für einen Oberflächenknoten ergibt sich folgende Bilanzgleichung.

$$C \cdot \dot{T}_i = \alpha_i \cdot (T_{i-1} - T_i) - \frac{K_i \cdot K_{i+1}}{K_i + K_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) \quad (19.)$$

Dabei bedeuten:

α_i Übergangswiderstand an der Fläche i in W/K

4.2.2.2 Diffusion

Einer Schicht zur Temperaturberechnung sind fünf Schichten im Feuchtemodell zugeordnet. Das verwendete Modell berücksichtigt Dampfdiffusion. Der Flüssigwasser- und der konvektive Feuchtetransport sind vernachlässigt.

Die Berechnung des Feuchtehaushalts wird analog zum Temperatursystem durchgeführt. Die Temperaturen entsprechen den Wasserdampfpartialdrücken und die Wärmeübergangs-, bzw. Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechen den Wasserdampfübergangs-, bzw. Wasserdampfdurchgangskoeffizienten. Die Wärmekapazität ist durch die Masse des Materials zu ersetzen.

4.2.2.2.1 Bilanzgleichung

Daraus ergibt sich die Bilanzgleichung für die Berechnung des Feuchtegehalts. Dieser ist über die Sorptionsisotherme mit dem Wasserdampfpartialdruck verknüpft.

$$\frac{d_i}{5} \cdot \dot{u}_i = M_i \cdot (pv_{s,i-1,i} - pv_i) - M_i \cdot (pv_i - pv_{s,i,i+1}) \quad (20.)$$

$$u_i = u(pv_i) \quad (21.)$$

Dabei bedeuten:

d_i	Dicke der Materialschicht i in m
u_i	Feuchtegehalt der Materialschicht i in kg/m^3
pv_i	Wasserdampfpartialdruck der Materialschicht i in Pa
M_i	Feuchteleitfähigkeit der Materialschicht i in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$
$pv_{s,i-1,i}$	Wasserdampfpartialdruck an der Schichtengrenze von Schicht $i-1$ und Schicht i in Pa
$u(pv_i)$	Sorptionsisotherme des Materials i

Die Feuchteleitfähigkeit für einen Knoten im Bauteilinneren errechnet sich aus der nächsten Gleichung.

$$M_i = \frac{\Delta}{\mu_i \cdot d/10} \quad (22.)$$

Die Feuchteleitfähigkeit für einen Knoten an der Bauteiloberfläche errechnet sich aus der nächsten Gleichung.

$$M_j = \frac{\Delta}{\mu_j \cdot d/5} \quad (23.)$$

Dabei bedeuten:

- Δ Dampfleitwert in $\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ errechnet sich aus $\Delta = \frac{D_0}{R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T}$
- D_0 Diffusionskonstante von Wasserdampf in Luft in m^2/s
- $R_{\text{H}_2\text{O}}$ Gaskonstante für Wasser in J/kgK
- T Schichttemperatur der Zone in $^\circ\text{C}$
- μ Diffusionswiderstandszahl der Schicht
- d Dicke einer Schicht

Der Wasserdampfpartialdruck an der Grenzschicht ergibt sich nach der folgenden Formel.

$$p_{s,i-1,i} = \frac{M_{i-1} \cdot p_{i-1} + M_i \cdot p_i}{M_{i-1} + M_i} \quad (24.)$$

Der Feuchtegehalt für Knoten im Bauteilinneren ergibt sich aus den Bilanzgleichungen nach Einsetzen der Grenzschichttemperaturen.

$$d_i \cdot \dot{u}_i = \frac{M_{i-1} \cdot M_i}{M_{i-1} + M_i} (p_{v,i-1} - p_{v,i}) - \frac{M_i \cdot M_{i+1}}{M_i + M_{i+1}} (p_{v,i} - p_{v,i+1}) \quad (25.)$$

Für einen Oberflächenknoten ergibt sich folgende Bilanzgleichung.

$$d_i \cdot \dot{u}_i = \beta_{t,i} \cdot (p_{v,i-1} - p_{v,i}) - \frac{M_i \cdot M_{i+1}}{M_i + M_{i+1}} (p_{v,i} - p_{v,i+1}) \quad (26.)$$

Dabei bedeuten:

- $\beta_{t,i}$ technischer Feuchteübergangswiderstand an der Fläche i in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$

4.2.3 Lüftung

4.2.3.1 Lüftungsanlage

Für die Berechnung der Zustände in den Bauteilen der Lüftungsanlage wurden die Bilanzgleichungen aus Punkt 4.2.1 verwendet.

4.2.3.2 Luftaustausch mit Außen

Der Luftaustausch einer Zone mit dem Außenbereich über gekippte oder vollständig geöffnete Fenster und Außentüren wird nach dem Ansatz für den Volumenstrom von [MAS95] berechnet. Dieser ermöglicht bei einseitigem Fensterlüften den Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, Raum- und Außenlufttemperatur sowie unterschiedlichen Fensteröffnungen eindeutig einen resultierenden Luftwechsel zuzuordnen.

$$\dot{g}_{zu} = \dot{g}_{ab} = \frac{A_1}{2} \cdot \Theta \sqrt{c_1 \cdot u_{met}^2 + c_2 \cdot H_1 \cdot \Delta\vartheta + c_3} \quad (27.)$$

Dabei bedeuten:

- \dot{g} Volumenstrom durch Fenster in kg/s
- A_1 lichte Öffnungsfläche in m² errechnet aus H·B
- H lichte Höhe der Öffnung in m
- B lichte Breite der Öffnung in m
- Θ Durchflussverhältnis am betrachteten Fenster, berechnet aus

$$\Theta = \frac{A_{eq(\alpha)}}{A_1}$$

$A_{eq(\alpha)}$ äquivalente Öffnungsfläche in m² beim Öffnungswinkel α , berechnet

$$\text{aus } A_{eq(\alpha)} = \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_s^2} \right)^{-0,5}$$

- A_s tatsächliche Öffnungsfläche in m² beim Öffnungswinkel α
- c_1 Konstante mit 0,0056
- c_2 Konstante mit 0,0037 m/s²K
- c_3 Konstante mit 0,012 m²/s²
- u_{met} Windgeschwindigkeit am Standort in m/s
- $\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft in K

4.2.3.3 Luftaustausch zwischen Zonen

Der Luftaustausch zwischen zwei Zonen über große vertikale Öffnungen wie eine geöffnete Tür wird nach den Ansätzen von [COC79] und [HEN93] berechnet. entsprechen den Verhältnissen in den betrachteten Zonen können sich uni- oder bidirektionale Ströme einstellen.

$$\dot{g}_{ij} = \sqrt{\rho_i} \cdot \operatorname{Re}(\cdot Z_a - \cdot Z_b) \quad (28.)$$

$$\dot{g}_{ji} = -\sqrt{\rho_j} \cdot \operatorname{Im}(\cdot Z_a - \cdot Z_b) \quad (29.)$$

Mit

$$Z_a = \frac{2\sqrt{2} \cdot C_d \cdot B \cdot H}{3 \cdot C_t} \cdot C_a^{3/2} \quad (30.)$$

$$Z_b = \frac{2\sqrt{2} \cdot C_d \cdot B \cdot H}{3 \cdot C_t} \cdot C_b^{3/2} \quad (31.)$$

Dabei bedeuten:

\dot{g}_{ij} Volumenstrom durch Öffnung von Zone i nach Zone j in kg/s

ρ_i Dichte der Luft in Zone i in kg/m³

C_d discharge factor (Durchflussbeiwert) 0,42

B lichte Breite der Öffnung in m

H lichte Höhe der Öffnung in m

C_t Faktor in Pa berechnet aus $C_t = \frac{g \cdot p_0 \cdot H}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_j} \right)$

g Erdbeschleunigung 9,81 m/s²

P_0 Referenzluftdruck 101325 Pa

R Gaskonstante für trockene Luft 287,1 J/kgK

T_i Temperatur der Zone in K

C_a Faktor in Pa berechnet aus $C_a = 1 - r_p \cdot C_t - (p_i - p_j)$ in Pa

C_b Faktor in Pa berechnet aus $C_b = (p_i - p_j) - r_p \cdot C_t$ in Pa mit $r_p = \frac{H_r}{H}$

p_i Druck in Zone i in Pa

H_r Höhe der Referenzebene über dem Fußboden in m

Die Volumenströme aus dem Ansatz für den Luftaustausch über große vertikale Öffnungen werden mit den Volumenströmen über diese Öffnungen verursacht durch die Lüftungsanlage überlagert.

4.3 Berechnungen mit Anlagenmodell in Simulink

Die Berechnungen zur Sicherstellung von Behaglichkeit und Gesundheit wird am Passivhaus Utendorfasse, das in Kapitel 2.4.1 beschrieben ist, vorgenommen.

4.3.1 Modellaufbau

In der folgenden Abbildung sind die wesentlichen Bestandteile des Modells verzeichnet.

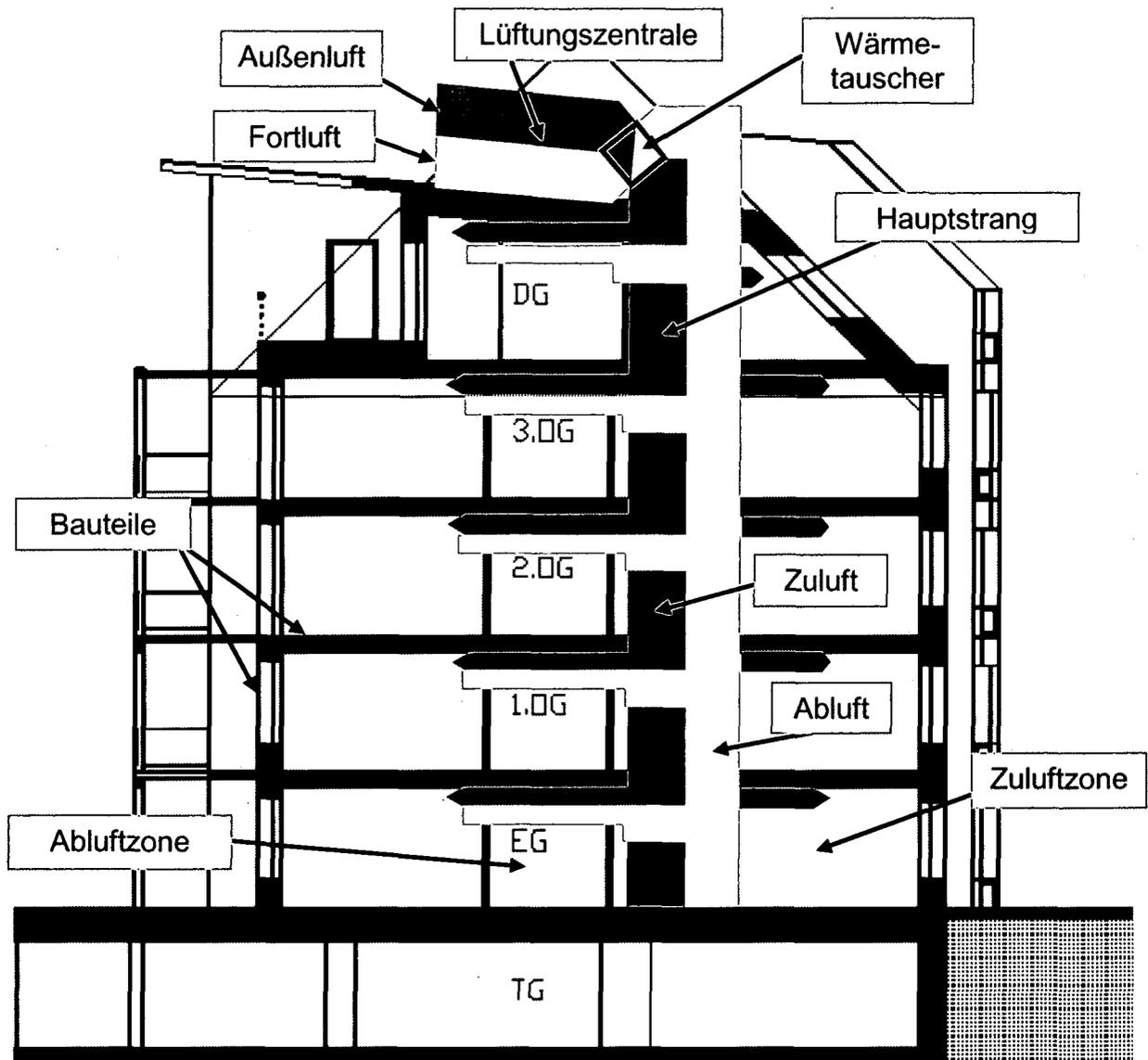


Abb. 46 Schematische Darstellung der Bestandteile des Modells

Das Modell besteht prinzipiell aus den Zu- und Abluftzonen, den Bauteilen und der Lüftungsanlage. Diese semidezentrale Anlage setzt sich aus der Lüftungszentrale, dem Hauptstrang und den Wohnungssträngen zusammen.

4.3.1.1 Zonen

Zur Modellierung des Gebäudes wurde Wohnung 2.2 im Haus 2 verwendet. Alle Eingaben des Modells wie Abmessungen, Konstruktionsaufbauten, Nutzung, Außenklima etc. entsprechen den Eingabewerten in Buildopt (siehe 2.4.2). Die Solareinträge auf die Fenster, die sich aus der Verschattungsberechnung in Buildopt ergeben, wurden übernommen.

Die Wohnung wurde in vier Zonen unterteilt. Die beiden nordseitigen Zimmer wurden zu einer Zuluftzone mit 25,41 m² zusammengefasst. Der Gang mit 10,38 m² entspricht der Überströmzone und das Bad, das WC und der Abstellraum wurden als Abluftzone mit einer Fläche von 8,44 m² modelliert. Der südorientierte Wohnraum mit einer Wohnnutzfläche von 29,73 m² ist Zu- und Abluftzone. Die Raumhöhe in den Wohnräumen und im Gang beträgt 2,5 m und im Sanitärbereich 2,2 m.

Thermisch sind die Zonen über Gipskartontrennwände und über Innentüren verbunden.

Die Feuchtelast wurde gleichmäßig verteilt mit 10 kg/Tag für die Wohnung 2.2 mit einer Wohnnutzfläche von ca. 74 m² angesetzt.

4.3.1.2 Lüftung

Für den Luftwechsel zwischen der Zuluft- und der Überströmzone bzw. zwischen der Überström- und der Abluftzone sind Überströmöffnungen mit einem Druckverlust von kleiner als 1 Pa vorgesehen.

Zur Berechnung der Varianten mit geöffneten Innentüren wurden die Türöffnungen mit 90/200 cm angesetzt.

Bei den Varianten mit Fensterlüftung wurden ein Fenster im Schlafrum und/oder im Wohnraum mit der Architekturlichte von 100/160 cm und einer lichten Öffnungsfläche von 78/138 cm viermal am Tag für 15 Minuten gekippt. Das Durchflussverhältnis Θ ergibt sich aufgrund der angesetzten Geometrie des gekippten Fensters mit 0,15.

4.3.1.3 Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage besteht aus dem Zuluft- und Abluftstrang, die sich in die Bereiche, Wohnungsstrang, Hauptstrang und Lüftungszentrale gliedern.

4.3.1.3.1 Lüftungszentrale

In der folgenden Abbildung ist ein Schema der Zentraleinheit der Lüftungsanlage für das Projekt Utendorfgasse dargestellt. [ANW03]

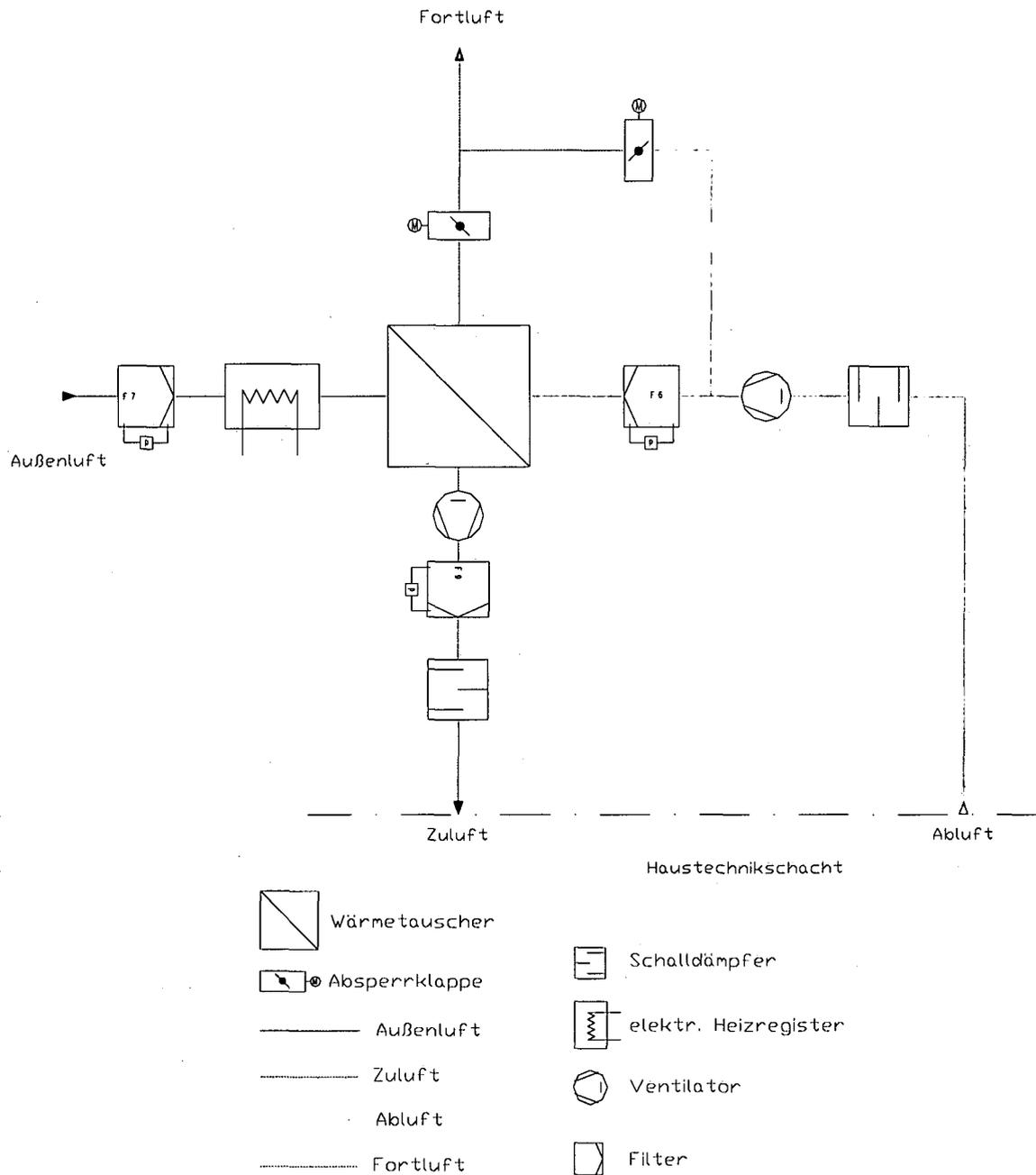


Abb. 47 Bestandteile der Lüftungszentrale, entnommen aus „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau Regelschöße“ [ANW03]

Die am Dach untergebrachte Lüftungszentrale hat eine Grundfläche von 3 m mal 5 m und ist 1,5 m hoch. Die Einhausung der Lüftungszentrale weist an den Außenflächen 30 cm Wärmedämmung auf. Die Bodenfläche tauscht über die Dachkonstruktion mit 40 cm Dämmung mit der Dachwohnung 2.12, die eine konstante Lufttemperatur von 22 °C hat, Energie aus.

Der Wärmetauscher hat eine Länge von 4 m, eine Breite von 0,8 m, eine Höhe von je 1,2 m und ist allseitig mit 20 cm Dämmstoff versehen. Um den Wärmeverlust zur Lüftungszentrale zu berechnen, ist der Wärmetauscher mit einer mittleren Temperatur aus dem Außenluft-, dem Zuluft-, dem Abluft und dem Fortluftstrom angesetzt.

Frostschutzregister

Zum Schutz vor Vereisung des Wärmetauschers ist ein elektrisch betriebenes Frostschutzregister unter einer Außentemperatur von $-2,5\text{ °C}$ in Betrieb genommen.

Wärmerückgewinnungsanlage

In der folgenden Tabelle sind die Wirkungsgrade in % des Wärmetauschers in Abhängigkeit des Volumenstromes V in m^3/h aufgelistet.

V in m^3/h	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Wirkungsgrad in %	80,0	80,8	81,4	81,7	82,0	82,4	83,0	83,5	84,0

Tab. 34 Wirkungsgrad des Wärmetauschers

Filter

Am Beginn der Zuluftleitung ist ein Filter der Klasse F7 und nach dem Wärmetauscher ist in der Zuluftleitung ein Filter der Klasse F9 angeordnet.

Ventilatoren

Der Luftwechsel wurde in allen Zonen mit $0,4\text{ h}^{-1}$ festgelegt. Die dazu erforderlichen Volumenströme werden durch drehzahlgeregelte Ventilatoren in die Zonen eingeblasen bzw. angesaugt.

4.3.1.3.2 Hauptstrang

Die Zu- und Ablufthauptstränge der Lüftungsanlage aus Blech mit einer Nennweite von 400 mm sind im Haustechnikschacht angeordnet und ungedämmt. Der Hauptschacht hat einen lichten Querschnitt von 80/200 cm und grenzt mit einer Breitseite an das Stiegenhaus, das mit einer konstanten Lufttemperatur von 16 °C angesetzt ist. Eine Schmalseite grenzt an die Überströmzone und die beiden anderen Seiten haben die Wohnung 2.1 mit konstant 22 °C Lufttemperatur als Nachbar. Die Wände des Hauptschachtes sind aus 18 cm Stahlbeton und 5 cm Wärmedämmung aufgebaut.

Zur Berechnung des Hauptzuluftstranges wurde der 13-fache Massenstrom von Wohnung 2.2 angesetzt. Dieser Faktor ergibt sich in etwa aus dem Flächenverhältnis der gesamten Wohnnutzfläche zum Anteil von Wohnung 2.2. Beim Abluftstrang wurde analog vorgegangen.

4.3.1.3.3 Wohnungsstrang

In der folgenden Abbildung ist ein Schema eines Wohnungsstranges der Lüftungsanlage für das Projekt Utendorfgasse dargestellt. [ANW03]

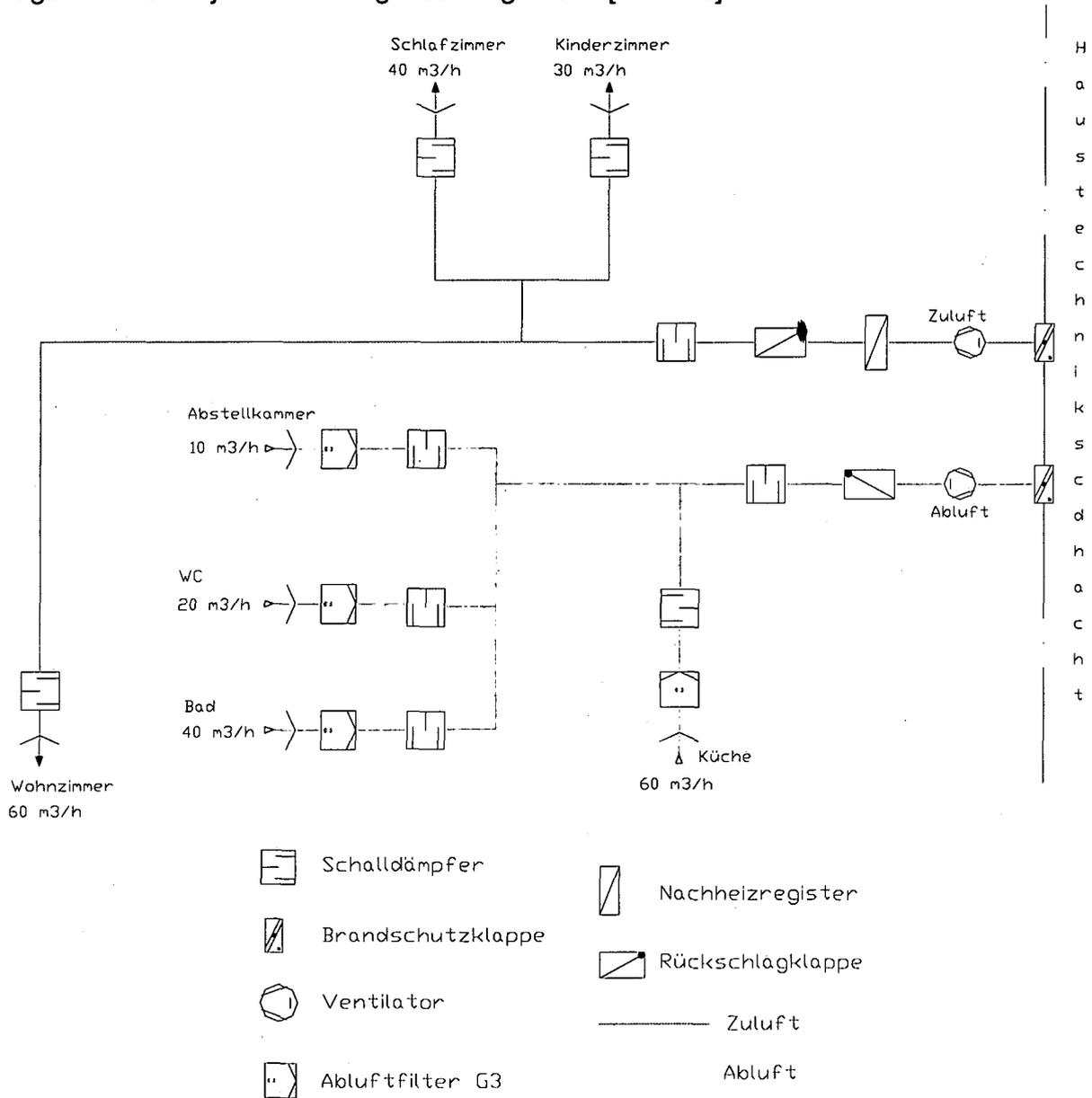


Abb. 48 Bauteile des Wohnungsstranges, entnommen aus „Anwendung der Pasivtechnologie im sozialen Wohnbau Regelgeschoße“ [ANW03]

Der Wohnungsstrang ist mit 5 cm Rohrdämmung umfasst und tauscht Energie mit der Raumluft aus.

Nachheizregister

Mit dem Nachheizregister im Zuluftstrang der Wohnung werden die Zuluftzonen auf eine empfundene Temperatur von 22 °C erwärmt. Die maximale Heizlast ist mit 10 W/m² Wohnnutzfläche begrenzt.

Ventilatoren

Der Anlagenluftwechsel wurde in allen Zonen mit $0,4 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Die dazu erforderlichen Volumenströme werden durch drehzahlregelte Ventilatoren in die Zonen eingeblasen bzw. abgesaugt.

4.3.2 Varianten

In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Varianten aufgelistet.

Variante	Zeit	Lüftung	Nachheizung
Winter Anlage	1. bis 14. Januar	Anlage	nach Bedarf
Winter Anlage und Fenster	1. bis 14. Januar	Anlage und Fensterlüftung	nach Bedarf
Winter Abschaltung	1. bis 14. Januar	Anlage und Fensterlüftung	zwischen 23.00 und 7.00 Uhr im Schlafrum außer Betrieb
Winter Türlüftung	1. bis 14. Januar	Anlage u. Fensterlüftung, Innentüren teils offen	nach Bedarf
Übergang Anlage	1. bis 14. April	Anlage	nach Bedarf
Übergang Anlage und Fenster	1. bis 14. April	Anlage und Fensterlüftung	nach Bedarf
Übergang Abschaltung	1. bis 14. April	Anlage und Fensterlüftung	zwischen 23.00 und 6.00 Uhr im Schlafrum außer Betrieb
Sommer Anlage und Fenster	7. bis 21. Juli	Anlage und Fensterlüftung	aus

Tab. 35 untersuchte Varianten

Die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten erfolgt in den Varianten „Anlage“ über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$. Die Fenster sind in diesen Fällen geschlossen.

Bei den Konfigurationen „Anlage und Fenster“ wird zusätzlich ein Fenster im Schlafrum viermal am Tag für jeweils 1 Stunde gekippt. Im Sommer ist in der Nacht zusätzlich ein Fenster im Wohnraum 12 Stunden lang geöffnet.

Die Auswirkungen einer „Abschaltung“ der Lüftungsanlage von 22.00 bis 7.00 Uhr werden in den entsprechenden Varianten untersucht. Die Abschaltung könnte eine eventuelle akustische Belästigung der Bewohner während des Schlafens verhindern.

Bei den Varianten mit „Türlüftung“ ist die Tür vom Schlafrum zum Gang tagsüber und die Tür vom Gang in den Wohnraum ständig geöffnet. Die Fenster werden im Schlafrum und im Wohnraum viermal am Tag für jeweils 1 Stunde gekippt und die Innentüren geschlossen.

4.3.3 Ergebnisse Winter

Die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten wurden bei den Varianten für den Winter vom 1. bis zum 14. Jänner mit den Klimadaten von Wien des Jahres 1997 berechnet. Den Berechnungsperioden ging jeweils eine einwöchige Einschwingphase voraus.

4.3.3.1 Winter Anlage

Bei Variante Winter Anlage erfolgt die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$. Die Fenster sind geschlossen.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten im Außenbereich und am Frostschutzregister vom 1. bis zum 14. Jänner dargestellt.

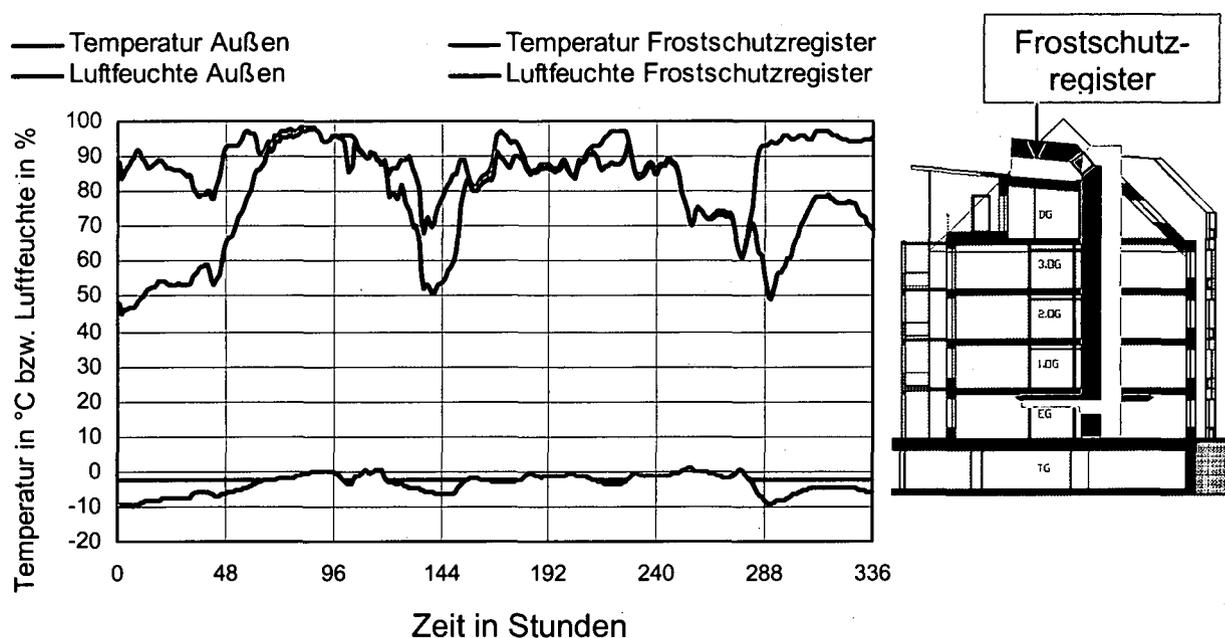


Abb. 49 Außenbereich und Frostschutzregister

Bei einer Außentemperatur unter $-2,5 \text{ °C}$ wird die Zuluft durch das Frostschutzregister auf $-2,5 \text{ °C}$ vorgewärmt und die relative Luftfeuchtigkeit entsprechend verringert.

Die Verhältnisse im Zuluftfilter vor dem Wärmetauscher und in der nachfolgenden Zuleitung zum Wärmetauscher entsprechen denen im Frostschutzregister.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen gegen die Luftfeuchtigkeit am Zuluffilter vor und am Zuluffilter nach dem Wärmetauscher (WT) dargestellt.

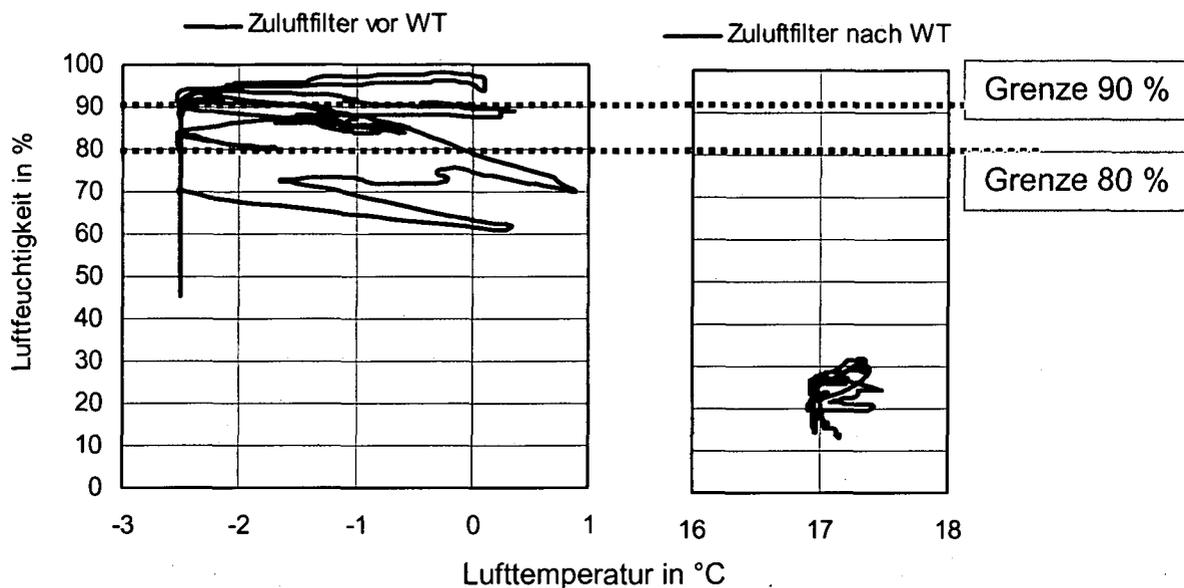


Abb. 50 Luftfeuchtigkeit gegen Lufttemperaturen an den Zuluffilter

Die Grenze von 90 % Luftfeuchtigkeit wird in dieser Periode nicht eingehalten. Auch die Grenze von 80 % Luftfeuchtigkeit wird länger als drei Tage überschritten. Somit werden am Zuluffilter vor dem Wärmetauscher die zulässigen Grenzen nach VDI 6022 nicht eingehalten. Im Projekt Utendorfgasse wird daher zur Filterung der Zuluft ein zweiter Filter der Klasse F9 nach dem Wärmetauscher eingebaut, um eine entsprechende Zuluftqualität zu gewährleisten. [ANW03] Die Luftfeuchtigkeiten am Zuluffilter nach dem Wärmetauscher liegen unter den Grenzwerten.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Zuluft- und im Ablufthauptstrang dargestellt.

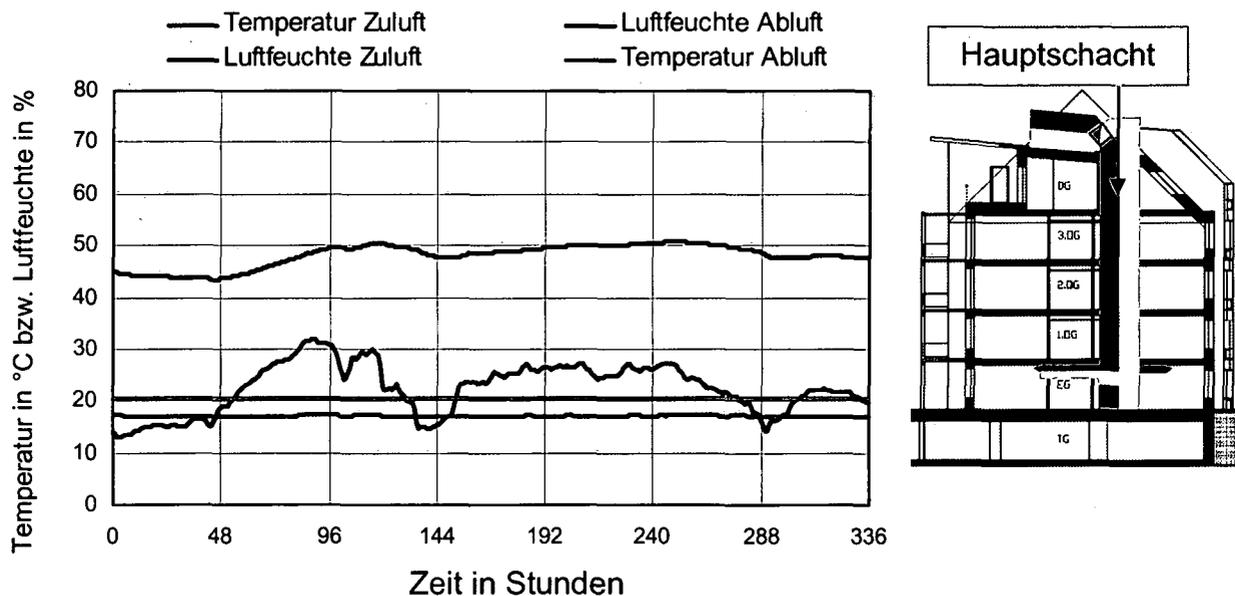


Abb. 51 Zuluft- und Ablufthauptstrang

In der Zuluftleitung im Hauptschacht stellt sich Temperatur von ca. 17 °C ein. Die Verhältnisse im Filter nach dem Wärmetauscher entsprechen denen im Zulufthauptstrang.

In der Abluftleitung liegt das Temperaturniveau bei ca. 20,4 °C. Die Temperatur im Haustechnikschacht, in dem sich der Zuluft- und der Ablufthauptstrang befinden, liegt in dieser Winterperiode bei ca. 19,5 °C mit Schwankungen von maximal 0,2 °C.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Schalldämpfer des Wohnungsstranges dargestellt.

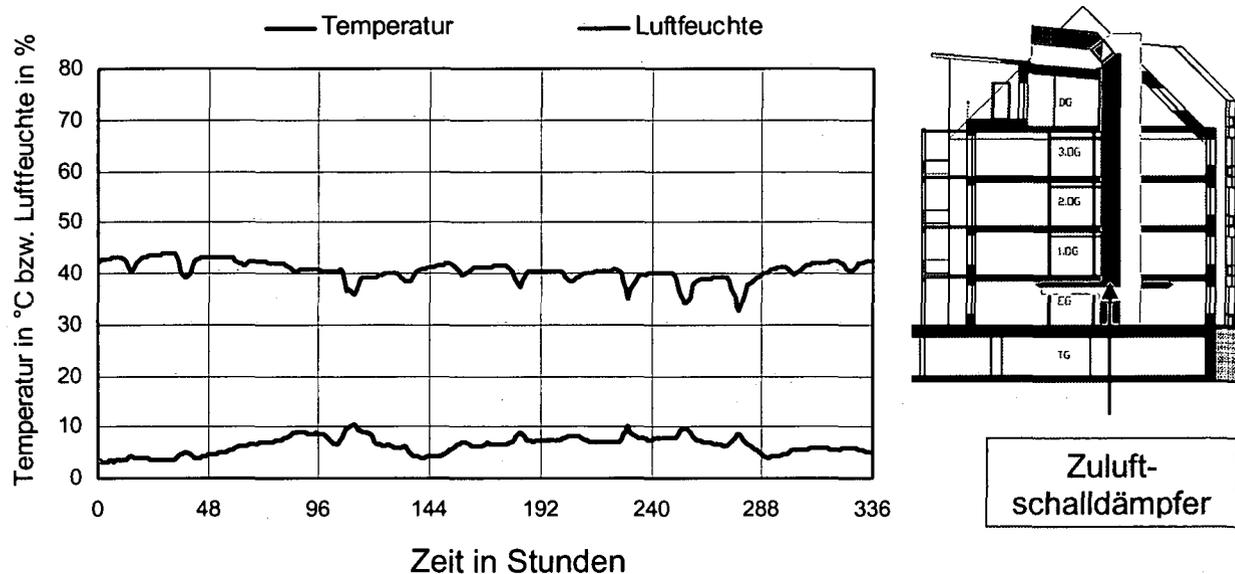


Abb. 52 Schalldämpfer des Zuluftstranges in der Wohnung

Die Temperatur im Schalldämpfer wird durch das vorgelagerte Nachheizregister im Mittel auf 40,5 °C erhöht und die mittlere Luftfeuchtigkeit wird auf ca. 6,5 % verringert.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Wohn- und im Schlafräum dargestellt.

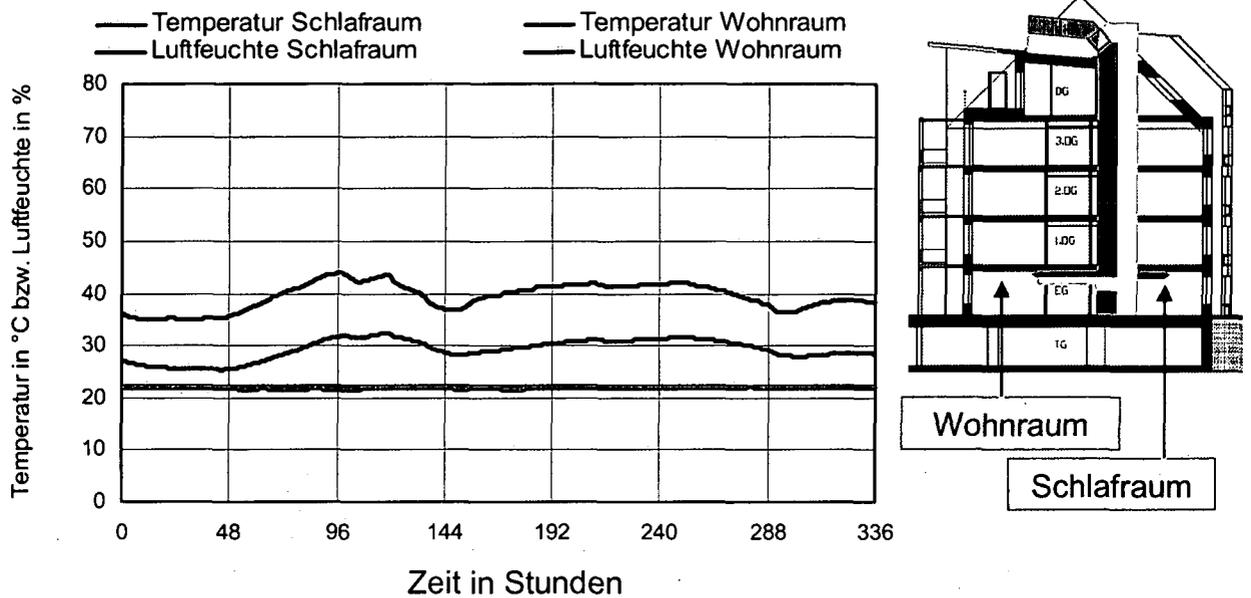


Abb. 53 Wohn- und Schlafräum

Im Schlafräum stellt sich eine mittlere Luftfeuchtigkeit von ca. 29,2 % ein und im Wohnraum ca. 39,4 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

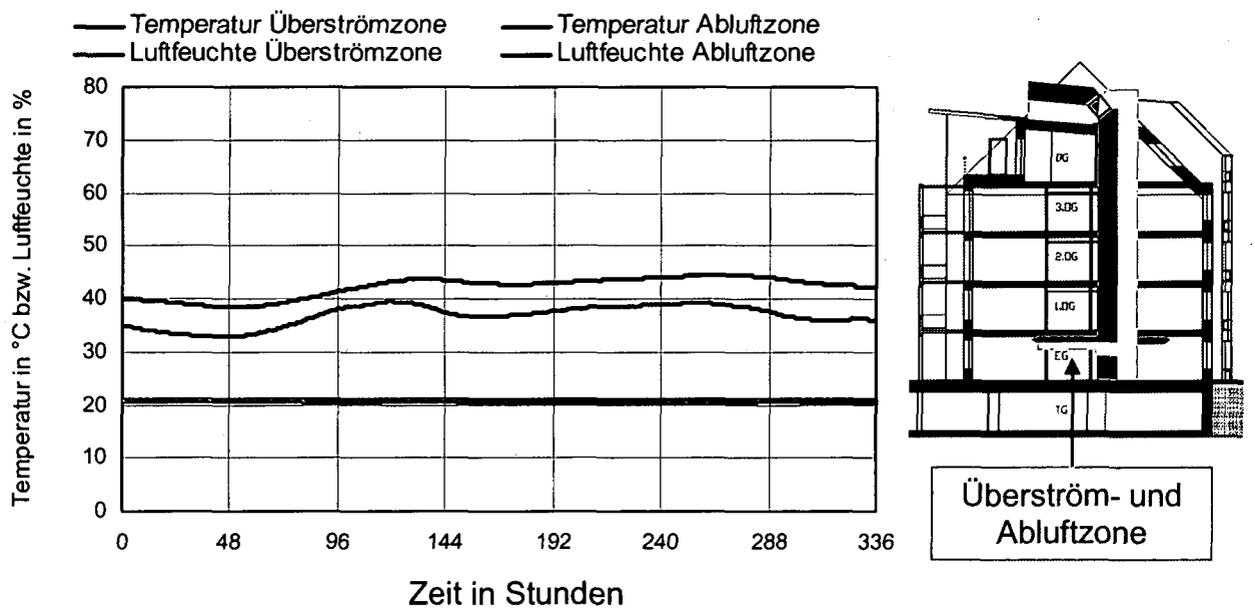


Abb. 54 Überström- und Abluftzone

In der Abluftzone ergibt sich aufgrund der längeren Verweildauer der Luft eine höhere Luftfeuchtigkeiten als in der Überströmzone.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner in den Abluftfiltern der Abluftzone und des Wohnraumes dargestellt.

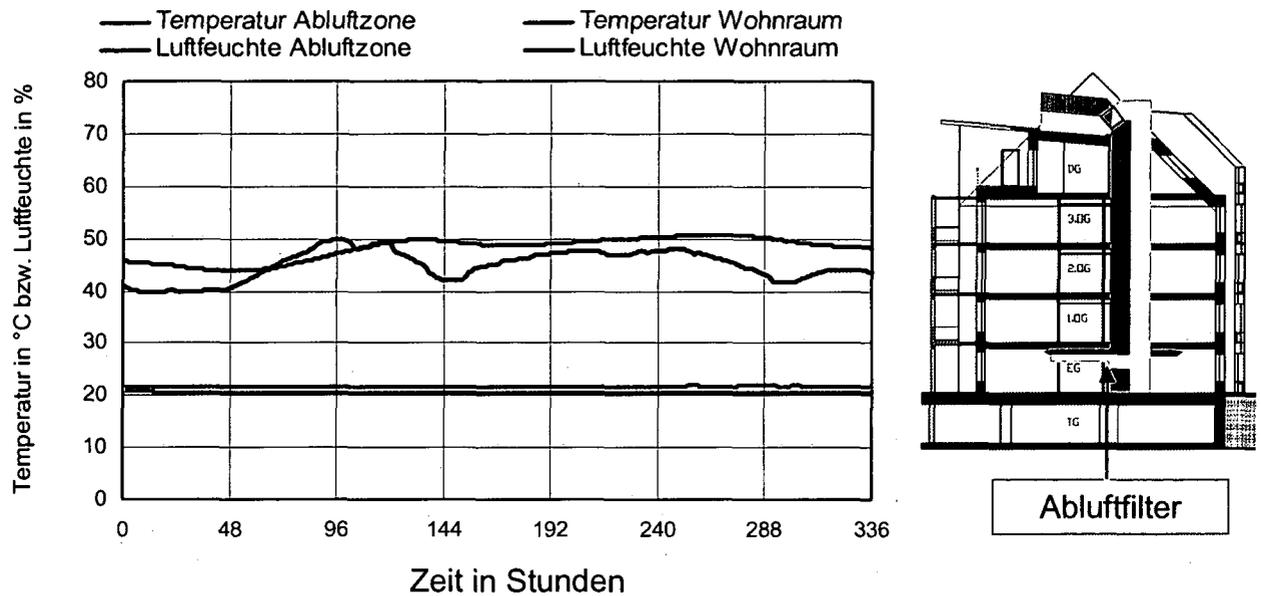


Abb. 55 Abluftfilter der Abluftzone und Wohnraum

Die Luftfeuchtigkeiten in den Filtern liegen zwischen 40 und 51 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Schalldämpfer des Abluftstranges der Wohnung dargestellt.

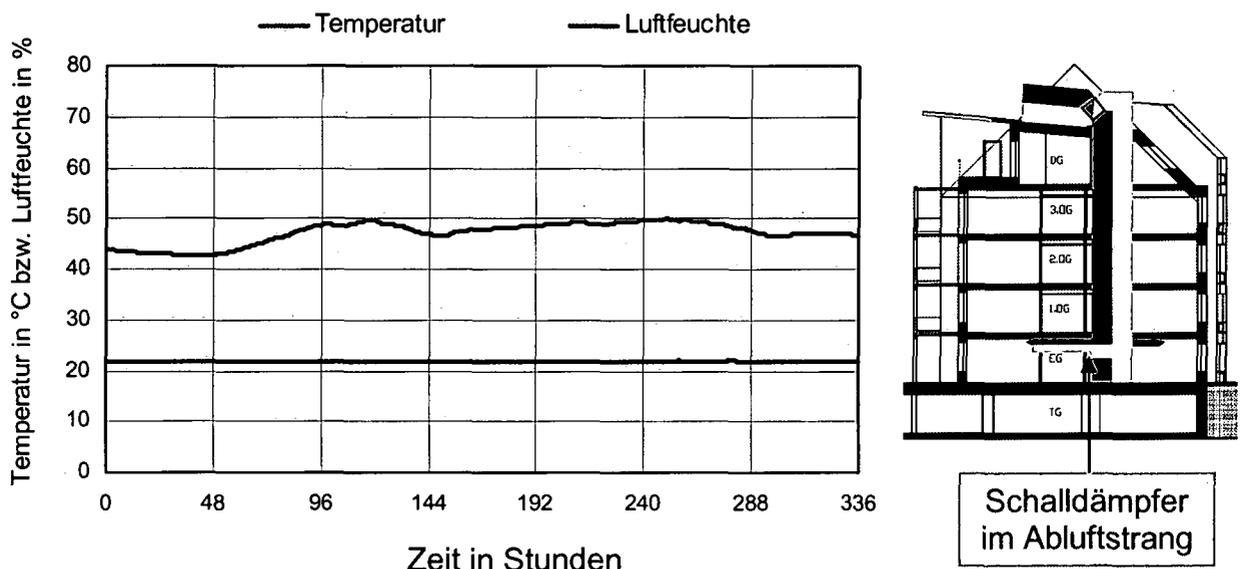


Abb. 56 Schalldämpfer im Wohnungsabluftstrang

Die Luftfeuchtigkeit im Abluftfilter und im Schalldämpfer des Wohnungsabluftstranges liegt in der Winterperiode zwischen ca. 40 und 52 % und die Temperaturen liegen zwischen 20 und 22 °C.

4.3.3.2 Winter Anlage und Fenster

Bei Variante Winter Anlage und Fenster erfolgt die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und ein Fenster im Schlafrum wird viermal am Tag für jeweils 60 Minuten gekippt.

In der folgenden Abbildung sind die durch die Fensterlüftung verursachten Luftwechsel im Schlafrum vom 1. bis zum 14. Jänner dargestellt.

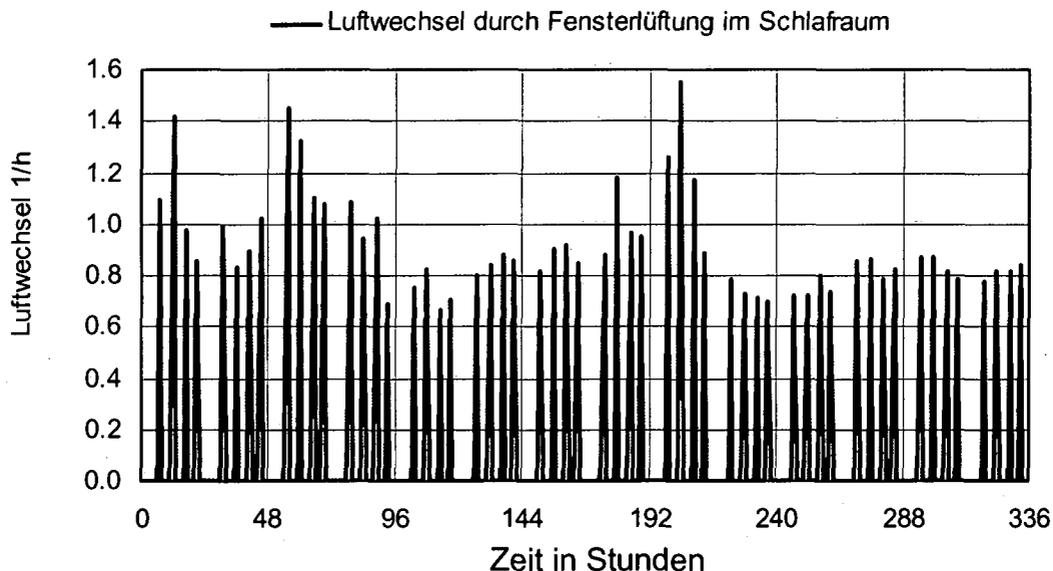


Abb. 57 Luftwechsel im Schlafrum durch viermaliges Fensterkippen pro Tag

Im Schlafrum stellen sich während der Zeiten, an denen ein Fenster gekippt ist, Luftwechselzahlen von ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$ bis $1,5 \text{ h}^{-1}$ und im Mittel ca. $0,93 \text{ h}^{-1}$ ein.

Die Lufttemperaturen und die Luftfechtigkeiten in den Bauteilen des Zuluft- und des Abluftstrang unterscheiden sich von der Variante Winter Anlage, wo nicht über die Fenster gelüftet wird, nur unwesentlich.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Wohn- und im Schlafrum dargestellt.

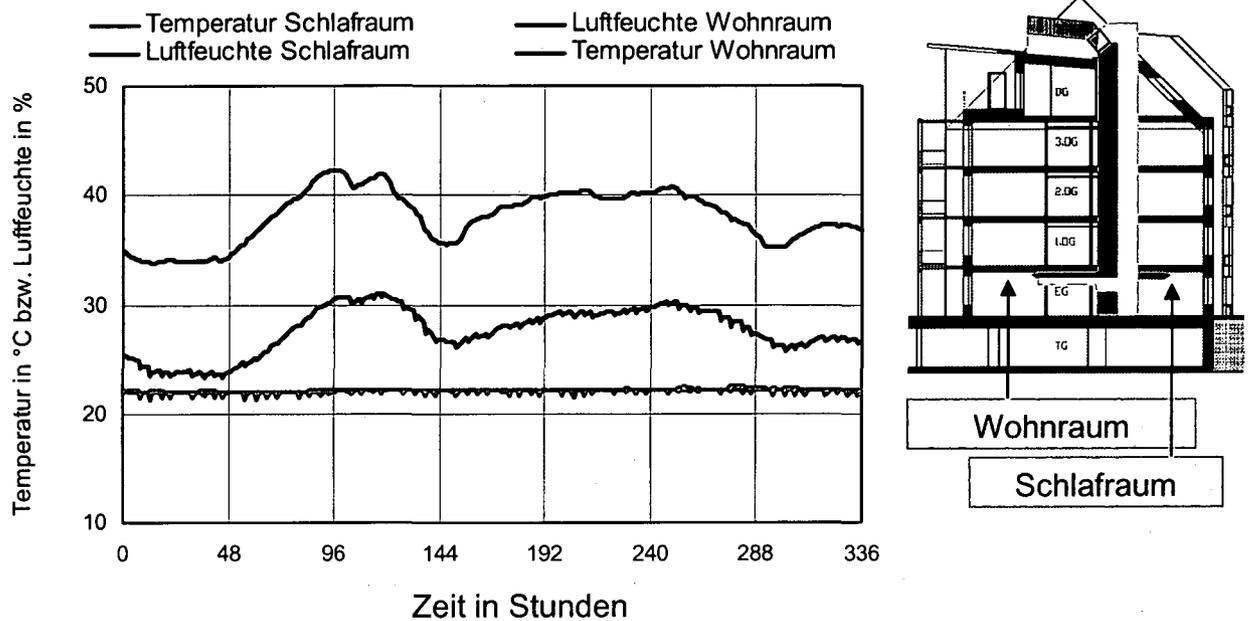


Abb. 58 Wohn- und Schlafrum

Während den Zeiten des Lüftens stellen sich in Abhängigkeit von den Klima- und Windverhältnissen Luftwechselzahlen zwischen ca. $0,6$ und $1,2 \text{ h}^{-1}$ ein. Die Lufttemperatur liegt im Schlafrum im Mittel bei $21,8 \text{ °C}$. Der Minimalwert liegt bei ca. $21,3 \text{ °C}$. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Schlafrum wird im Vergleich zur vorgehenden Variante um ca. $1,4 \%$ verringert.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

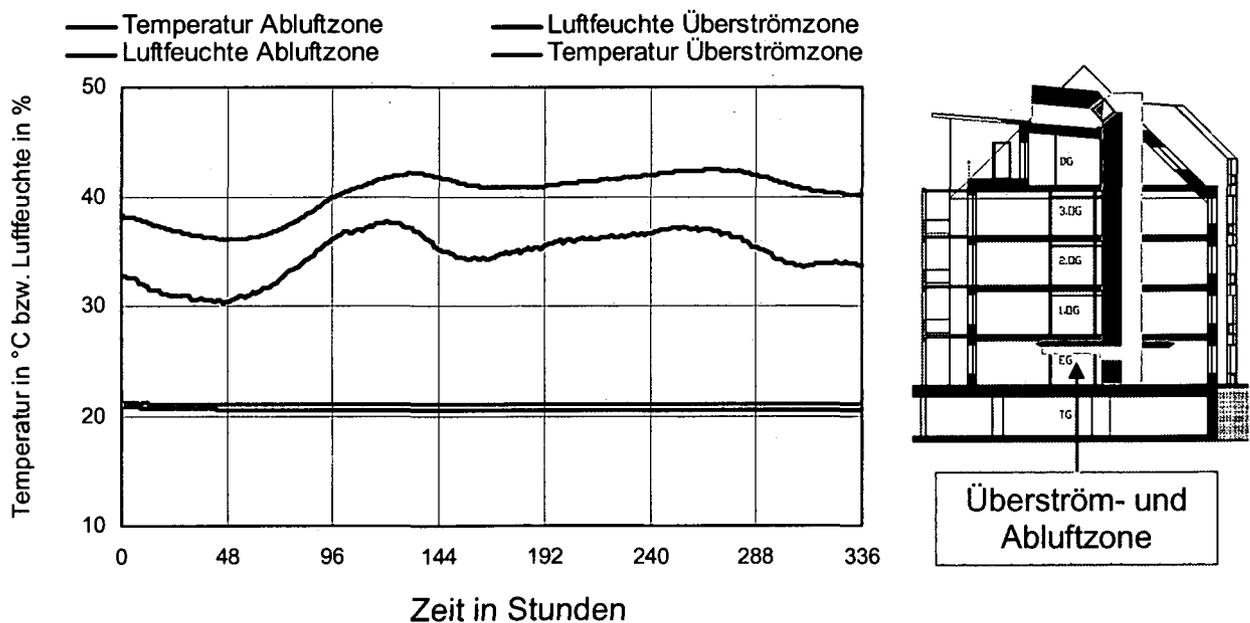


Abb. 59 Überström- und Abluftzone

Die Verhältnisse in der Überström- und in der Abluftzone ändern sich im Vergleich zur Variante Winter Anlage kaum.

4.3.3.3 Winter Abschaltung

Bei der Variante Winter Abschaltung erfolgt die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und ein Fenster im Schlafraum wird viermal am Tag für jeweils 60 Minuten gekippt. Durch die Fensterlüftung ergeben sich dieselben Luftwechselzahlen wie bei der vorangegangenen Variante.

In den Nachtstunden von 22.00 bis 7.00 Uhr ist die Lüftungsanlage im Schlafraum ausgeschaltet, um eine eventuelle akustische Belästigung während des Schlafens zu verhindern. Die Fechtelast in der Schlafzone für zwei Erwachsene, ein Kind und zwei Zimmerpflanzen wird für die Variante Abschaltung in den Nachtstunden mit 200 g/h angesetzt. Tagsüber verbleiben nur die Pflanzen mit einer Feuchteproduktion von 65 g/h .

Die Verhältnisse in den Bauteilen des Zuluft- und des Abluftstranges unterscheiden sich von den zuvor angeführten Varianten für den Winter praktisch nicht.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Wohn- und im Schlafraum dargestellt.

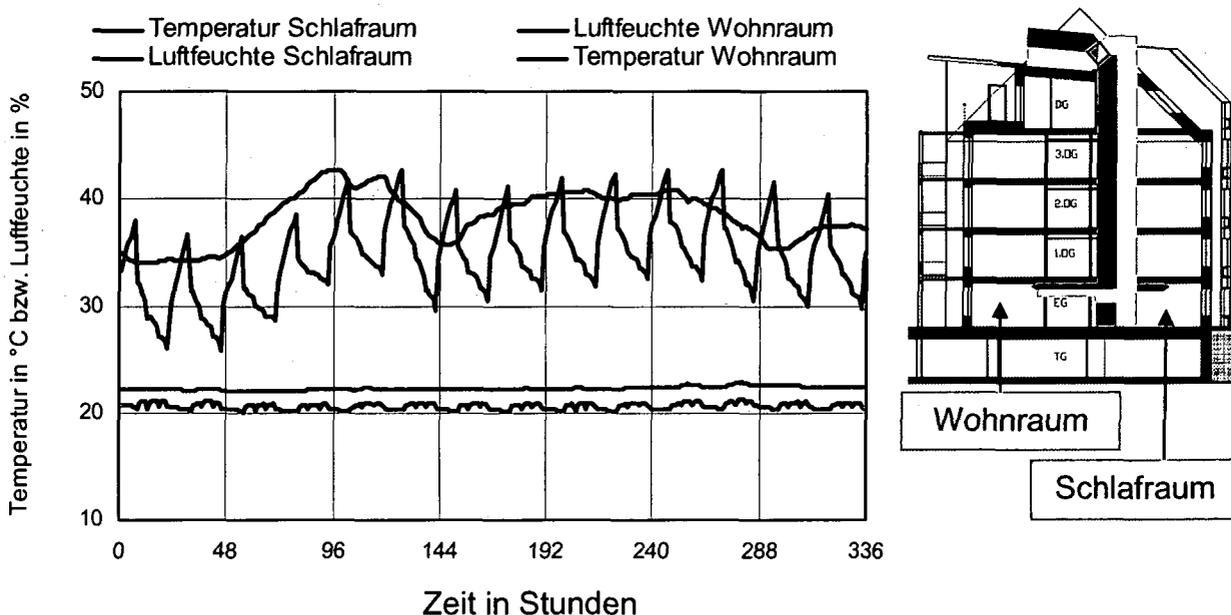


Abb. 60 Wohn- und Schlafraum

Die Lufttemperatur im Schlafraum sinkt in der Nacht auf minimal $19,9 \text{ °C}$ während die Luftfeuchte bis auf maximal ca. $42,7 \text{ %}$ steigt. Durch das Abschalten der Lüftungsanlage sinkt die mittlere Lufttemperatur im Schlafraum auf $20,6 \text{ °C}$.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

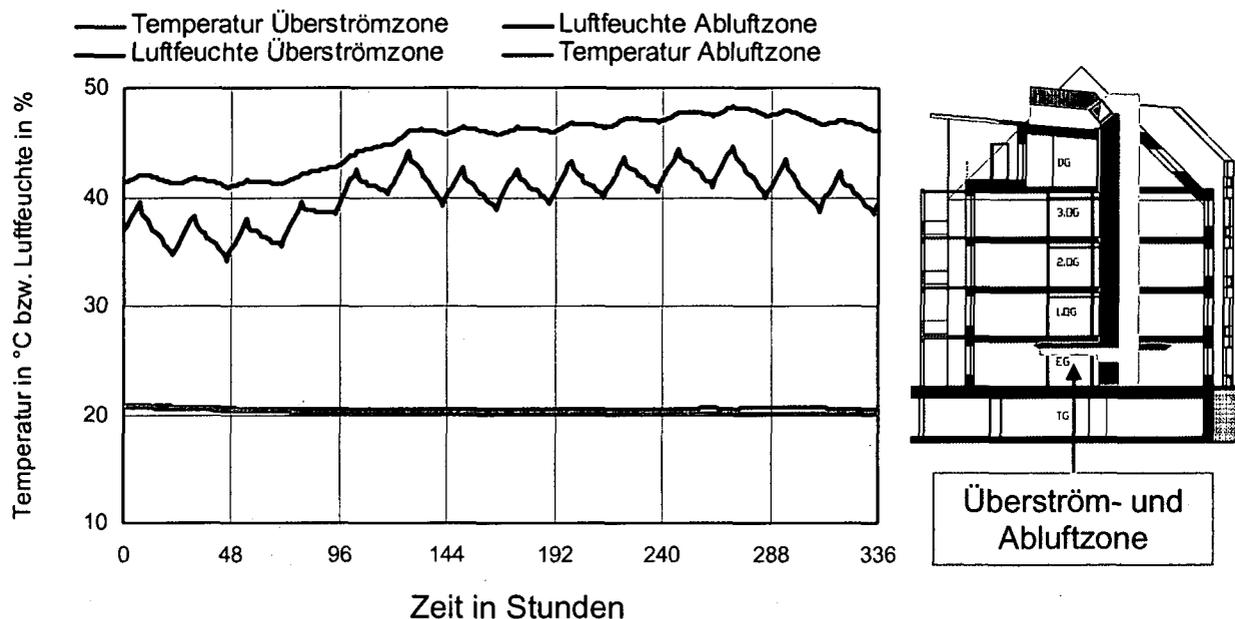


Abb. 61 Überström- und Abluftzone

Die mittlere Luftfeuchtigkeit beträgt in der Überströmzone ca. 40,1 % und in der Abluftzone ca. 45,9 %. Die Lufttemperaturen im Gang und in der Abluftzone liegen immer über 20 °C.

4.3.3.4 Ergebnisse Türlüftung

Bei den Varianten Türlüftung ist die Tür vom Schlafräum zum Gang tagsüber und die Tür vom Gang in den Wohnraum ständig geöffnet. Die Fenster werden im Schlafräum und im Wohnraum viermal am Tag für jeweils 1 Stunde gekippt und die Innentüren geschlossen. Dadurch ergeben sich dieselben Luftwechselzahlen wie bei der vorangegangenen Variante. Die Lüftungsanlage ist ständig in Betrieb.

Die Verhältnisse in den Bauteilen des Zuluft- und des Abluftstranges unterscheiden sich von den zuvor angeführten Varianten für den Winter praktisch nicht.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Schlafräum und in der Überströmzone dargestellt.

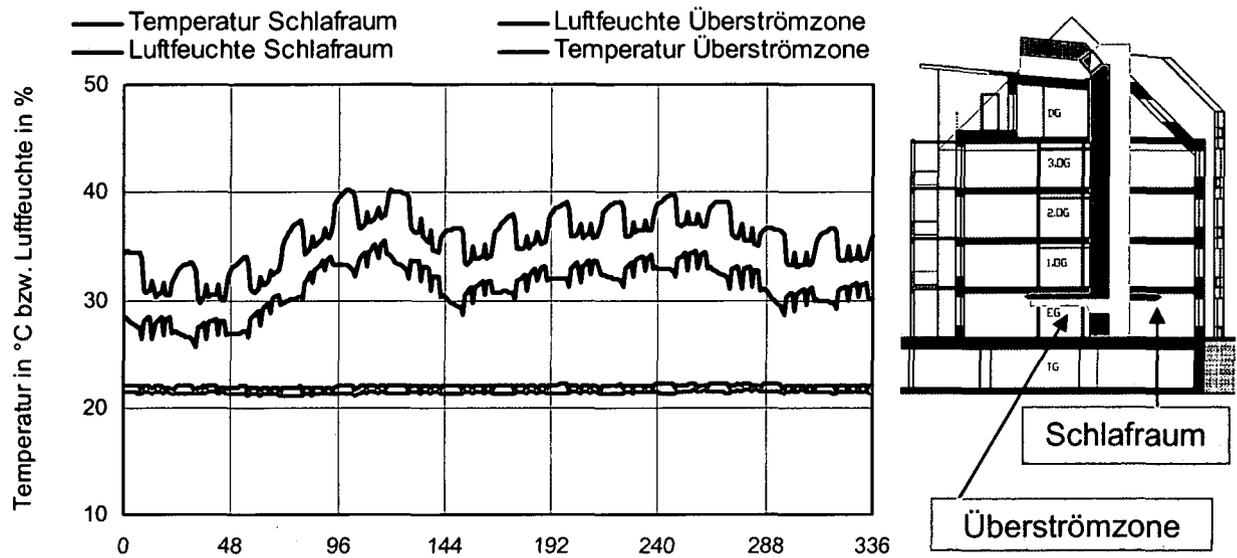


Abb. 62 Schlafräum und Überströmzone

Bei geöffneter Innentür nähern sich die Verhältnisse im Schlafräum und in der Überströmzone an. In den Nachtstunden steigt die Luftfeuchtigkeit im Schlafräum wieder an. Die mittlere Temperatur beträgt im Schlafräum ca. 22 °C und die mittlere Luftfeuchtigkeit ca. 31,2 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. Jänner im Wohnraum in der Überströmzone dargestellt.

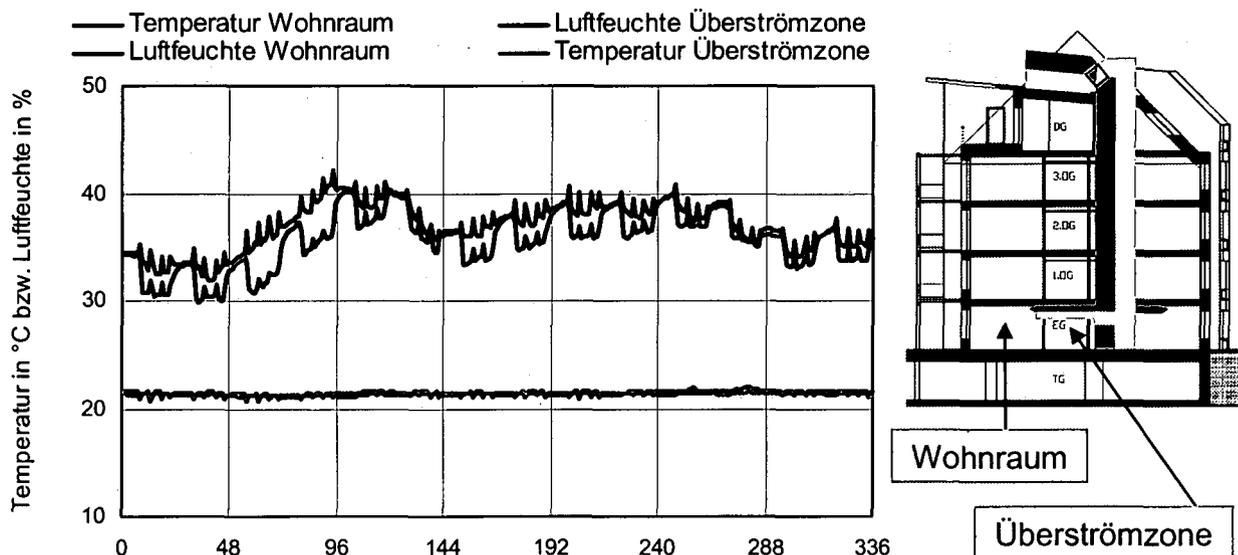


Abb. 63 Wohnraum und Überströmzone

Im Wohnraum stellt sich eine mittlere Temperatur von ca. 21,4 °C und eine mittlere Luftfeuchtigkeit von ca. 37 %. In der Überströmzone ist die mittlere Temperatur ca. 21,4 °C und die mittlere Luftfeuchtigkeit ca. 36 %. Die Verhältnisse in der Überström-

zone und im Wohnraum nähern sich durch den Luftaustausch über die geöffnete Innentür an. Bezogen auf das Volumen des Wohnraumes von ca. 74 m³ ergibt sich bei geöffneter Innentür eine mittlere Luftwechselzahl von ca. 2,9 h⁻¹.

4.3.4 Ergebnisse Übergang

Die Lufttemperaturen und die Luftfechtigkeiten wurden bei den Varianten für die Übergangsjahreszeit vom 1. bis zum 14. April mit den Klimadaten von Wien des Jahres 1997 berechnet. Den Berechnungsperioden ging jeweils eine einwöchige Einschwingphase voraus.

4.3.4.1 Übergang Anlage

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfechtigkeiten des Außenbereichs vom 1. bis zum 14. April dargestellt.

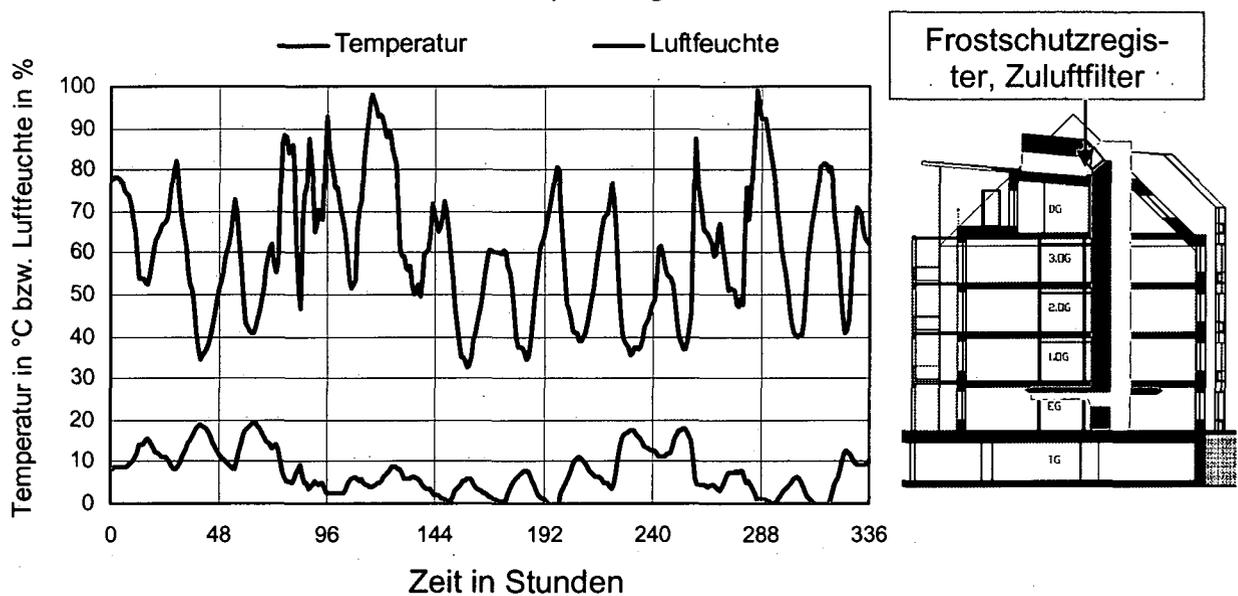


Abb. 64 Außenbereich, Frostschutzregister und Zuluftfilter

Die Bedingungen am Frostschutzregister und am Zuluftfilter sind gleich wie die Außenbedingungen.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen gegen die Luftfeuchtigkeit am Zuluftfilter vor und am Zuluftfilter nach dem Wärmetauscher (WT) dargestellt.

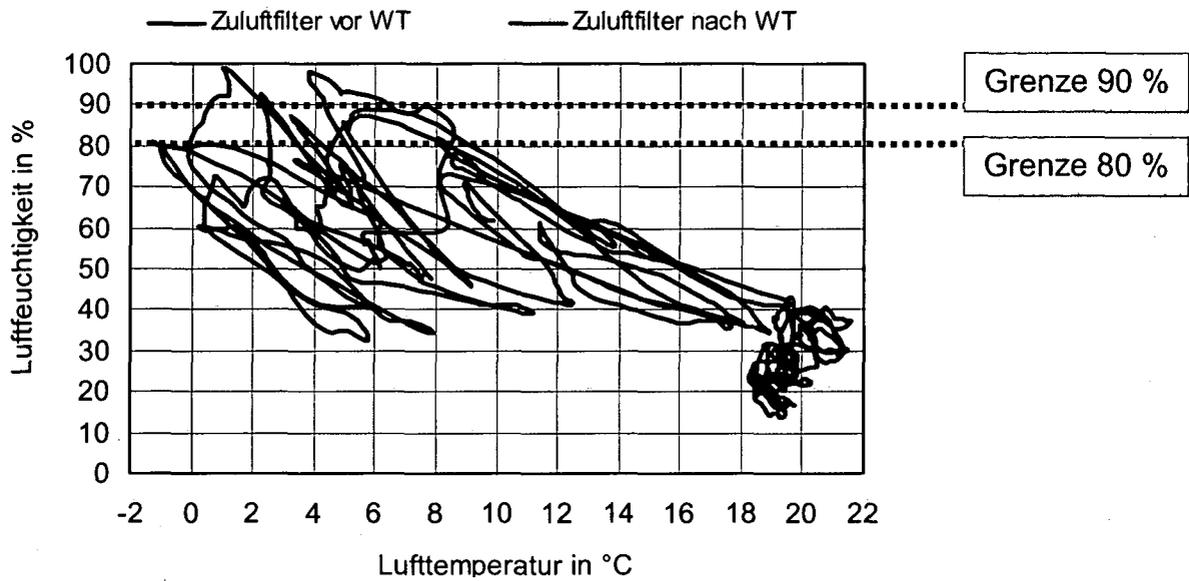


Abb. 65 Luftfeuchtigkeit gegen Lufttemperaturen an den Zuluftfilter

Die Grenze von 80 % Luftfeuchtigkeit wird nicht länger als drei Tage überschritten. Allerdings wird die Grenze von 90 % Luftfeuchtigkeit in dieser Periode nicht eingehalten. Die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter nach dem Wärmetauscher liegen im unbedenklichen Bereich.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im Zuluft- und im Ablufthauptstrang dargestellt.

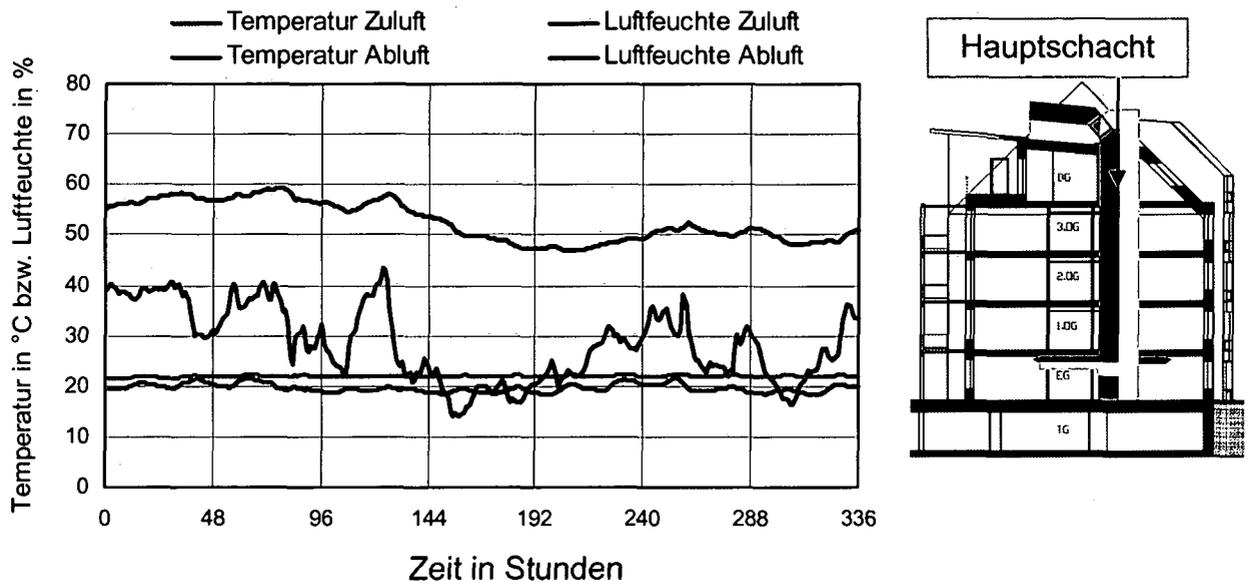


Abb. 66 Zuluft- und Ablufthauptstrang

In der Zuluftleitung im Hauptschacht stellt sich eine Temperatur von ca. 19,6 °C ein. Die Verhältnisse im Filter nach dem Wärmetauscher entsprechen denen im Zuluft Hauptstrang. Die berechnete Temperatur im Haustechnikschacht liegt in dieser

Periode bei ca. 20,7 °C. In der Abluftleitung liegen das Temperaturniveau bei ca. 22 °C und die mittlere Luftfeuchtigkeit bei ca. 52,7 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im Schalldämpfer des Zuluftstranges in der Wohnung dargestellt.

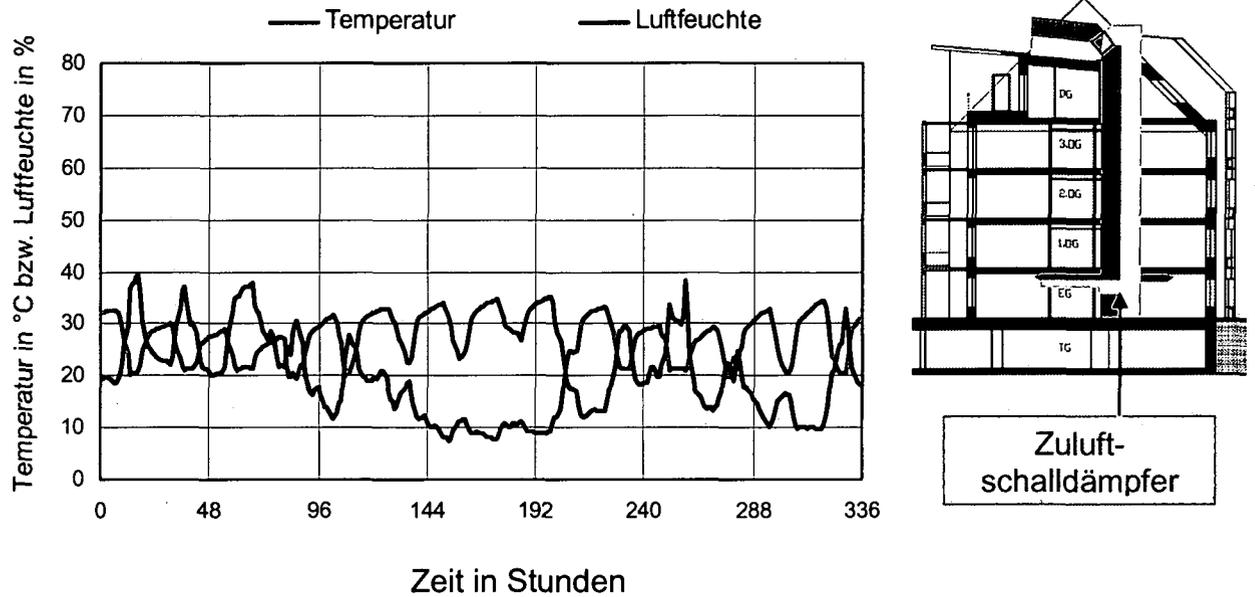


Abb. 67 Schalldämpfer des Zuluftstranges in der Wohnung

Die Temperatur im Schalldämpfer wird durch das vorgelagerte Nachheizregister im Mittel auf 27,6 °C erhöht und die relative Luftfeuchtigkeit wird auf ca. 19 % verringert.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im Wohn- und im Schlafrum dargestellt.

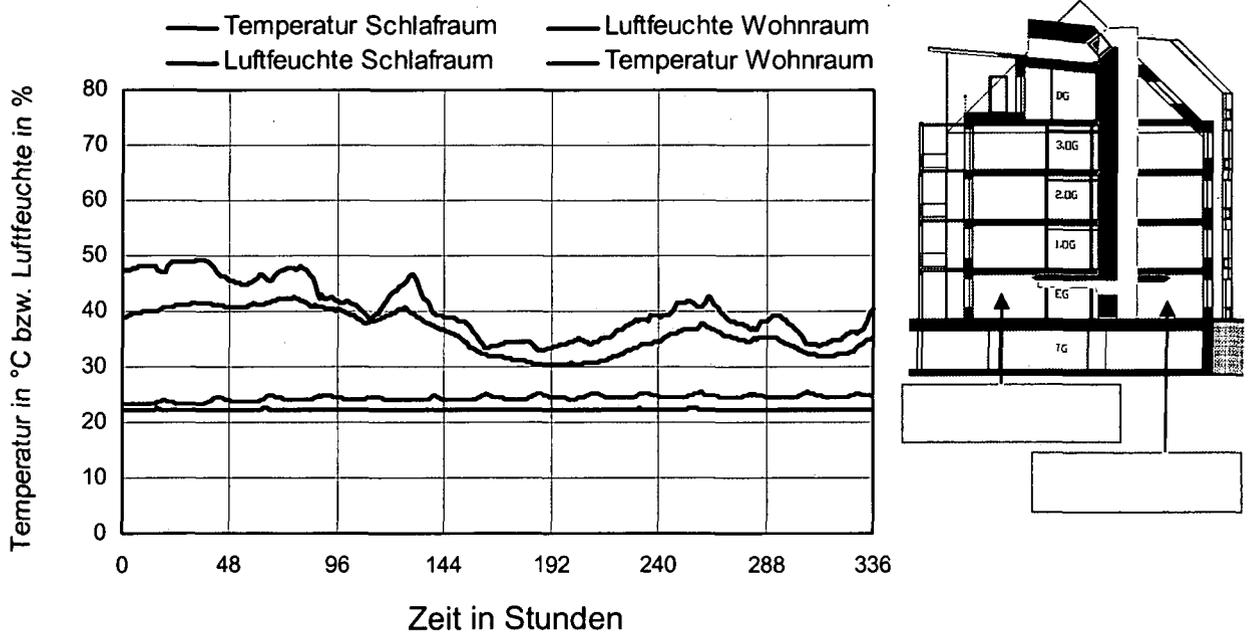


Abb. 68 Wohn- und Schlafrum

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

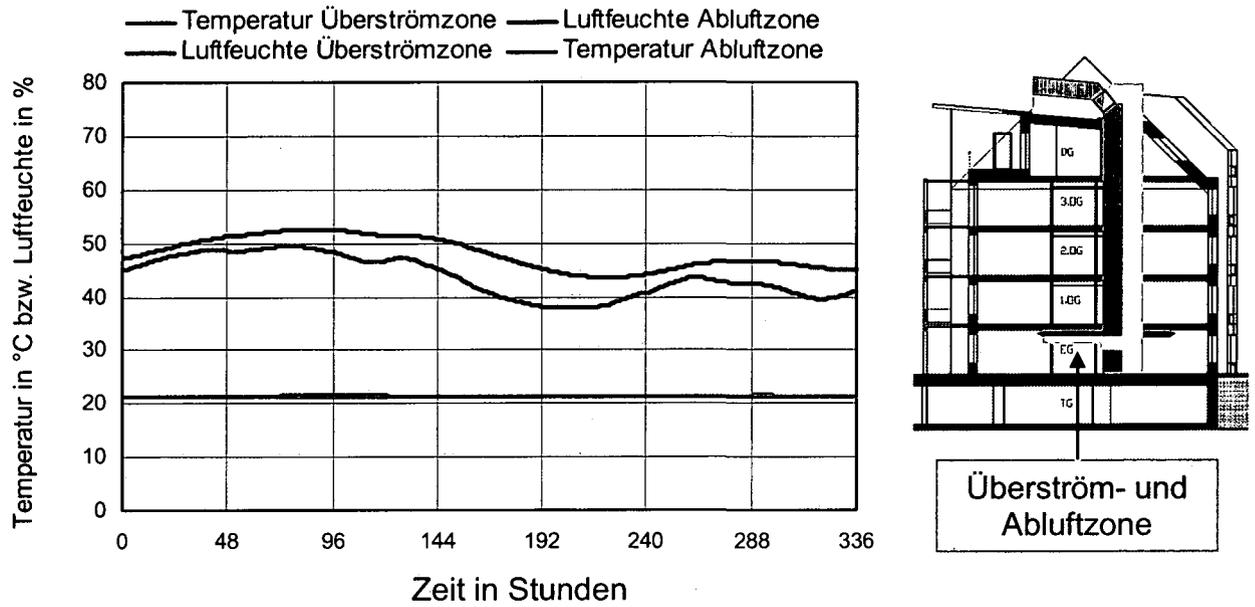


Abb. 69 Überström- und Abluftzone

Die Temperaturen in den Räumlichkeiten liegen zwischen 20 und 24 °C und die Luftfeuchtigkeiten zwischen 30 und 55 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in den Abluftfiltern der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

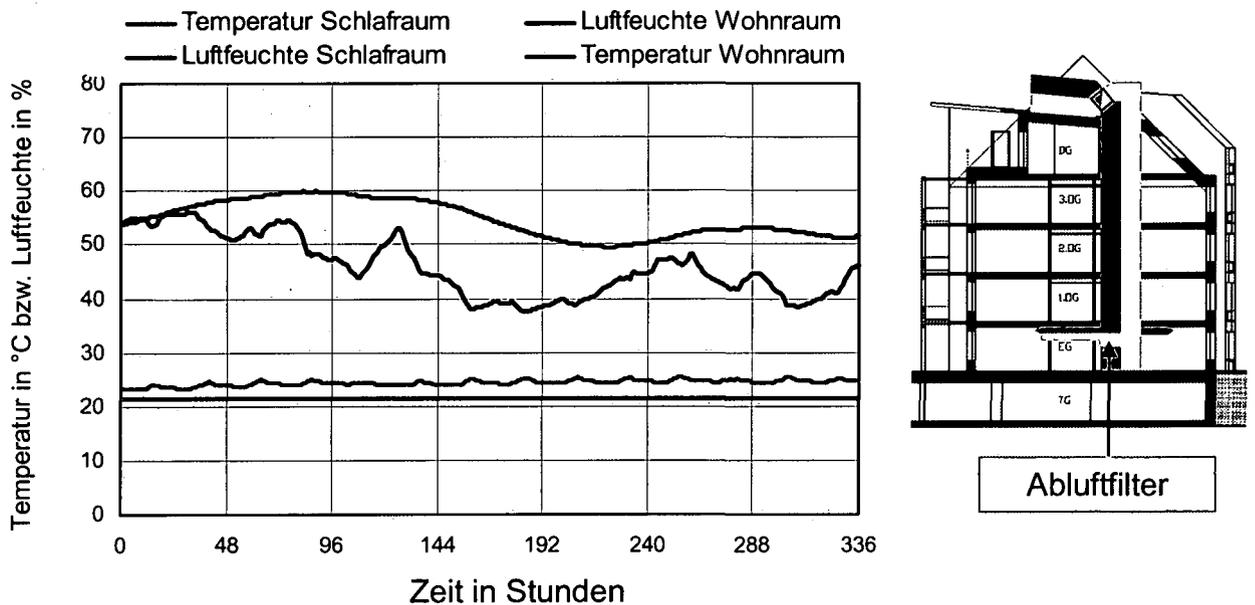


Abb. 70 Abluftfilter der Überström- und Abluftzone

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im des Schalldämpfers der der Wohnung im Abluftstrang dargestellt.

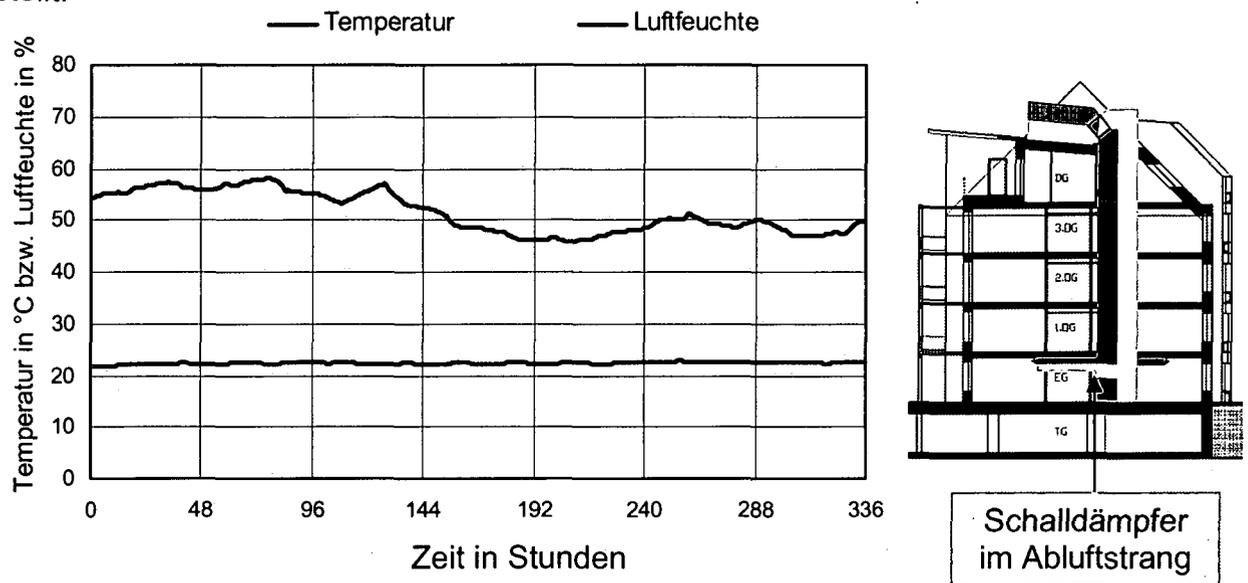


Abb. 71 Schalldämpfer im Wohnungsabluftstrang

Die Luftfeuchtigkeit im Abluftfilter und im Schalldämpfer des Wohnungsabluftstranges liegt stets unter 60 % und die Temperaturen liegen zwischen 20 und 24 °C.

4.3.4.2 Übergang Anlage und Fenster

Bei Variante Übergang Anlage und Fenster erfolgt die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und ein Fenster im Schlafraum wird viermal am Tag für jeweils 60 Minuten gekippt.

In der folgenden Abbildung sind die durch die Fensterlüftung verursachten Luftwechsel im Schlafraum vom 1. bis zum 14. April dargestellt.

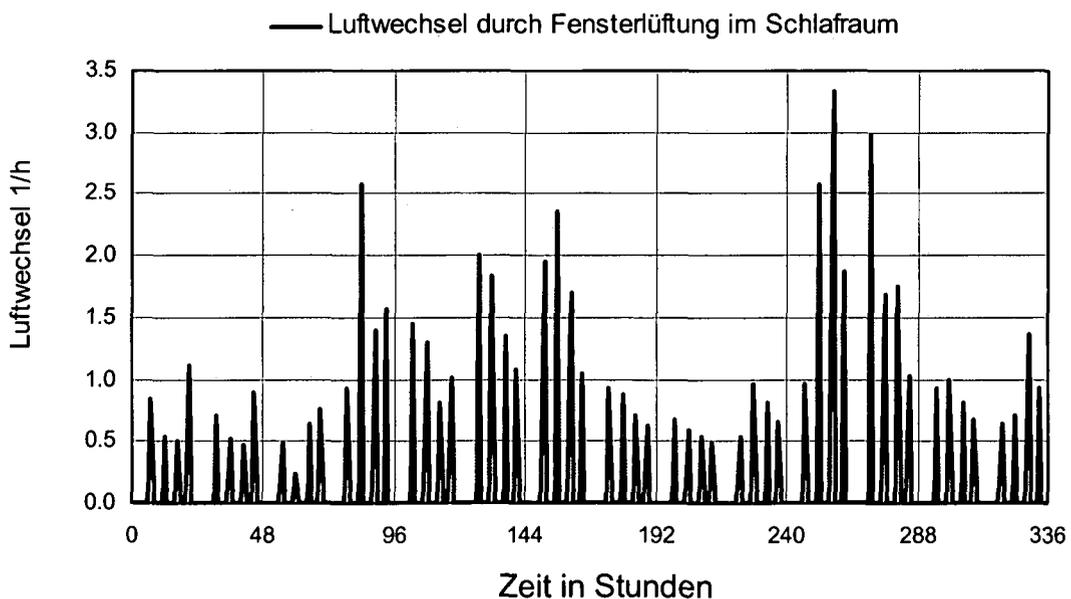


Abb. 72 Luftwechsel im Schlafraum durch viermaliges Fensterkippen pro Tag

Im Schlafraum stellen sich während der Zeiten, an denen ein Fenster gekippt ist, Luftwechselzahlen von ca. $0,23 \text{ h}^{-1}$ bis $3,30 \text{ h}^{-1}$ und im Mittel ca. $1,14 \text{ h}^{-1}$ ein. Der Luftwechsel aufgrund der Fensterlüftung beträgt bezogen auf die gesamte Simulationsperiode von 14 Tagen ca. $0,19 \text{ h}^{-1}$.

Die Lufttemperaturen und die Luftfechtigkeiten an den Bauteilen im Zuluft- sowie im Abluftstrang der Wohnung unterscheiden sich von der Variante Übergang Anlage, wo nicht über die Fenster gelüftet wird, praktisch nicht.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfechtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im Wohn- und im Schlafraum dargestellt.

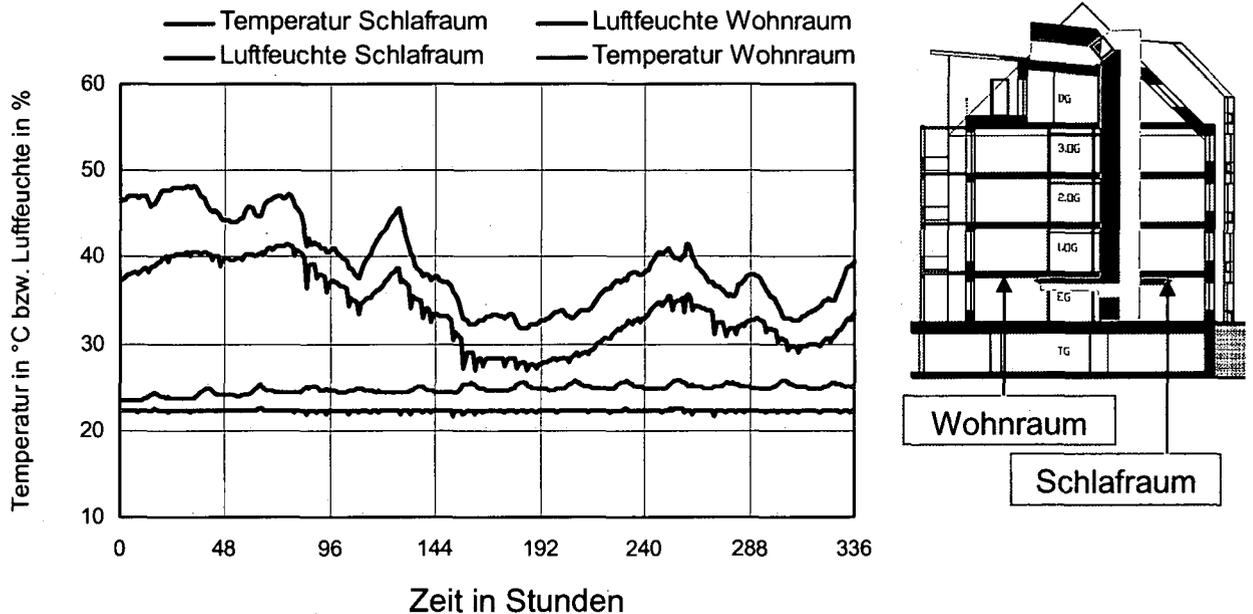


Abb. 73 Wohn- und Schlafraum

Die Lufttemperaturen bleiben im Wohnraum und Schlafraum gegenüber der Variante ohne Fensterlüftung praktisch gleich. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Schlafraum sinkt um ca. 1,3 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

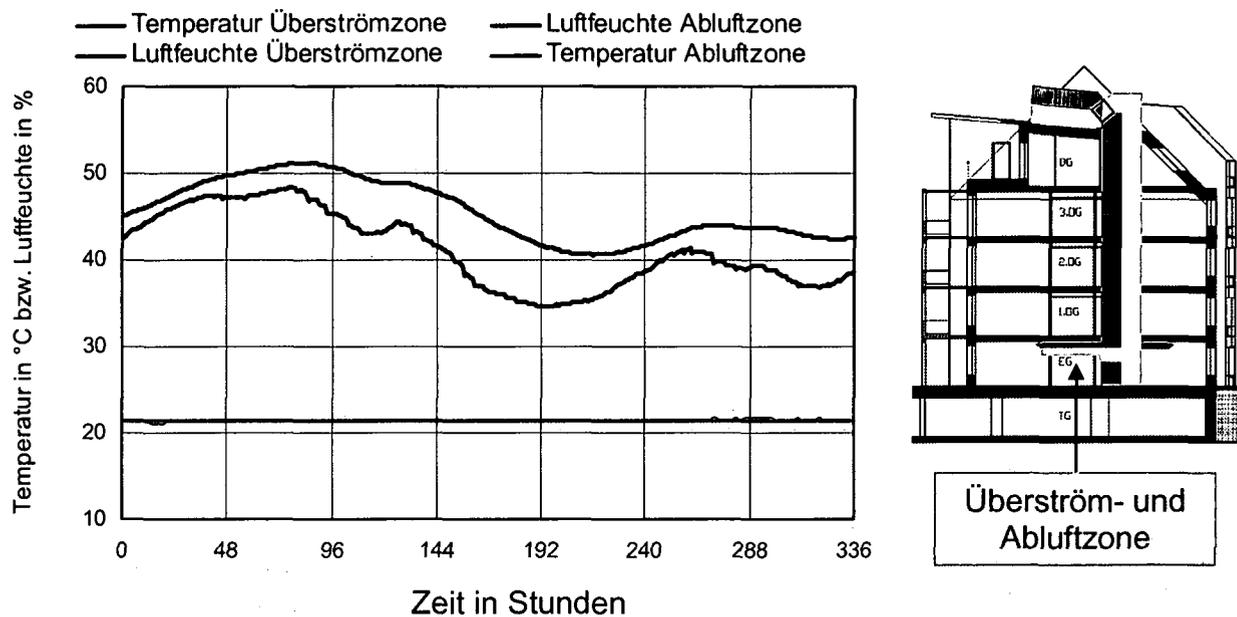


Abb. 74 Überström- und Abluftzone

In diesen Zonen bleibt der Mittelwert der Lufttemperatur praktisch unbeeinflusst und die Luftfeuchte sinkt geringfügig.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in den Abluftfiltern der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

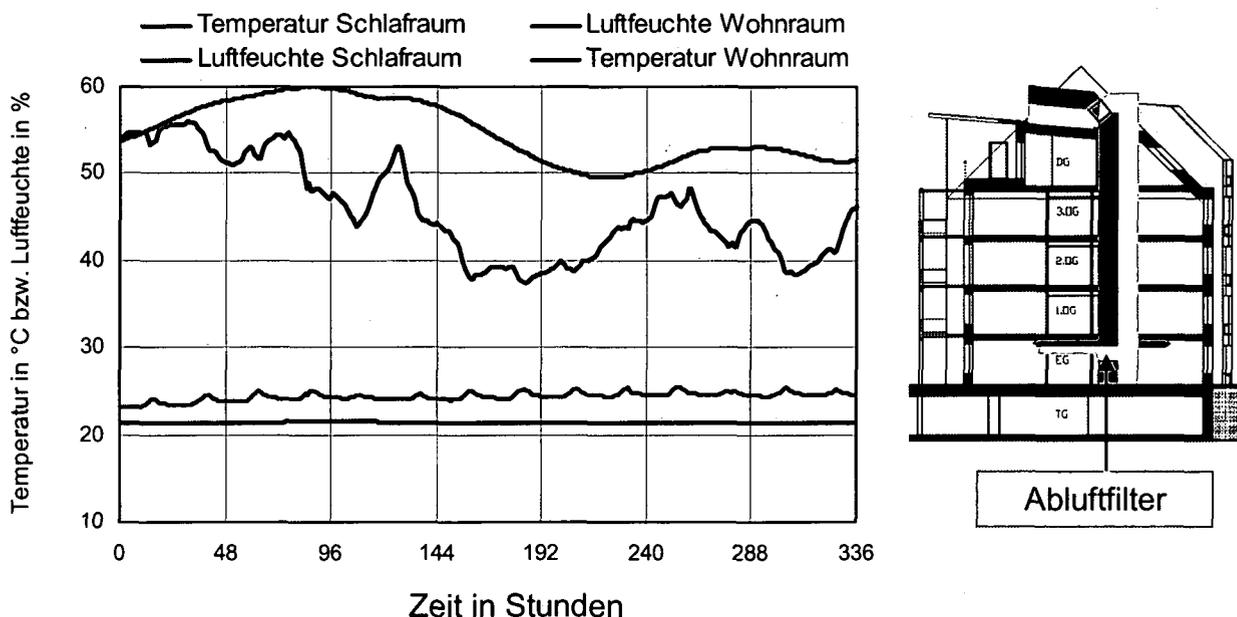


Abb. 75 Abluftfilter der Überström- und Abluftzone

Im Abluftfilter der Abluftzone steigt die Luftfeuchtigkeit in dieser Variante auf im Mittel ca. 54,8 % an. Die Temperatur im Abluftfilter des Wohnraumes steigt bis ca. 25,4 °C.

4.3.4.3 Übergang Abschaltung

Bei der Variante Übergang Abschaltung erfolgt die Be- und Entlüftung über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und ein Fenster im Schlafrum wird viermal am Tag für jeweils 60 Minuten gekippt. Durch die Fensterlüftung ergeben sich dieselben Luftwechselzahlen wie bei der vorangegangenen Variante. In den Nachtstunden von 23.00 bis 6.00 Uhr wird die Lüftungsanlage im Schlafrum ausgeschaltet.

Die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten an den Bauteilen im Zuluft- sowie im Abluftstrang der Wohnung unterscheiden sich von der Variante Übergang Anlage, wo nicht über die Fenster gelüftet wird, praktisch nicht.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April im Wohn- und im Schlafrum dargestellt.

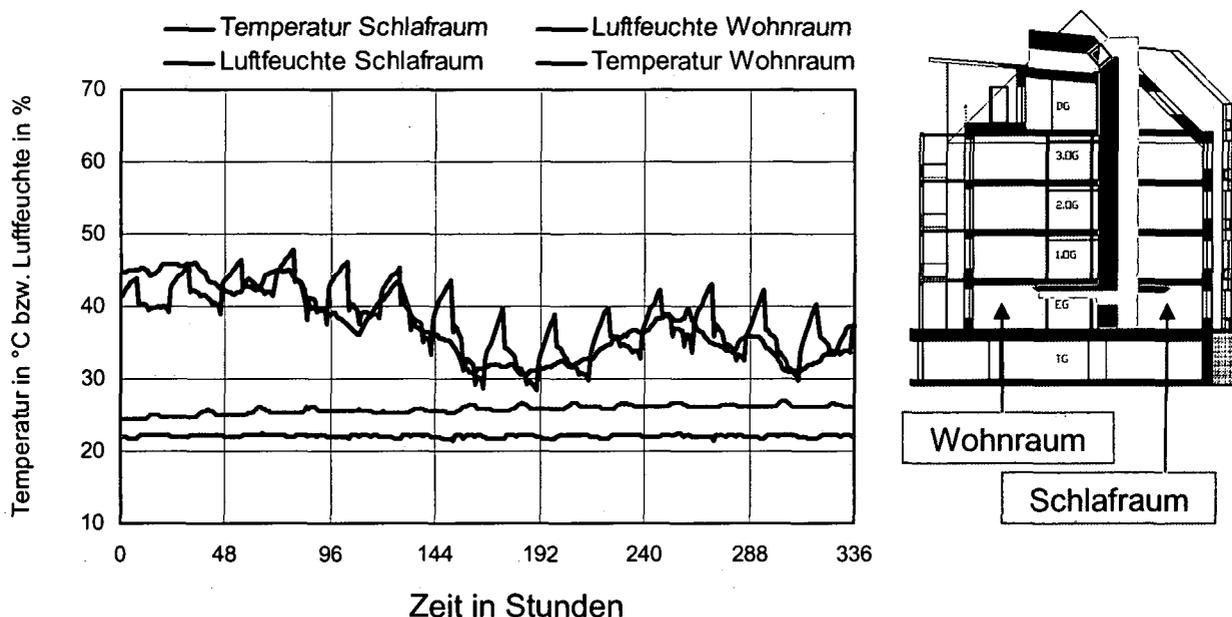


Abb. 76 Wohn- und Schlafrum

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

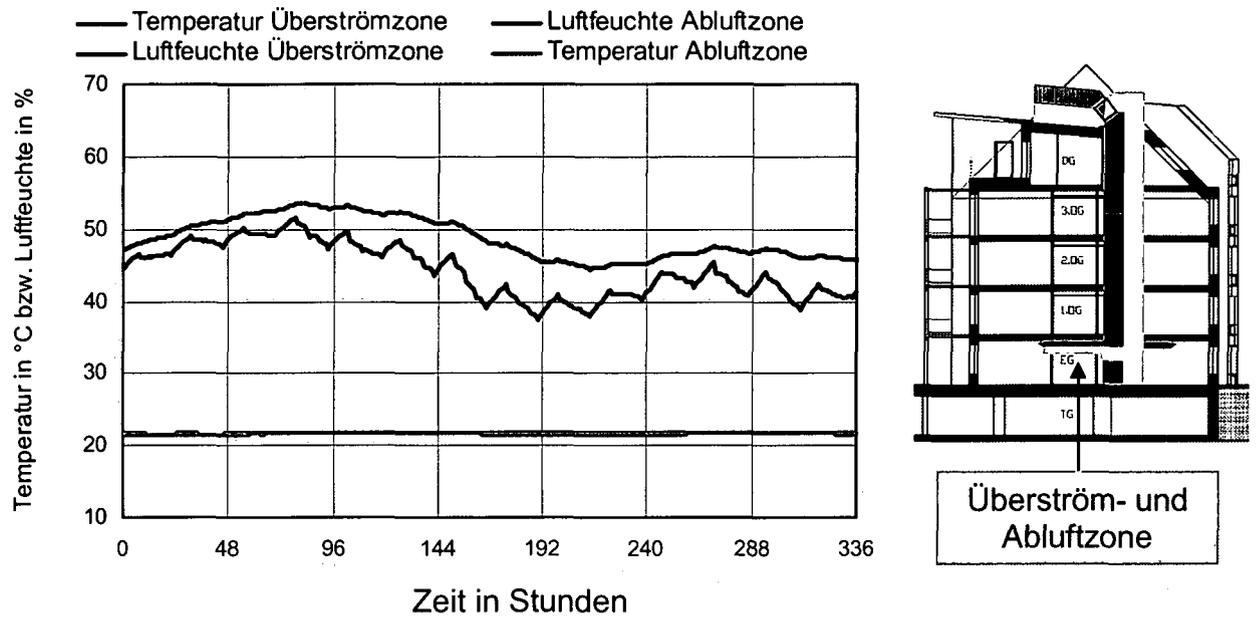


Abb. 77 Überström- und Abluftzone

Durch das Abschalten der Lüftungsanlage steigt die Luftfeuchtigkeit in den Räumlichkeiten um ca. bis zu 8 % im Vergleich zu Variante Übergang Anlage und Fenster.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 1. bis zum 14. April in den Abluftfiltern der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

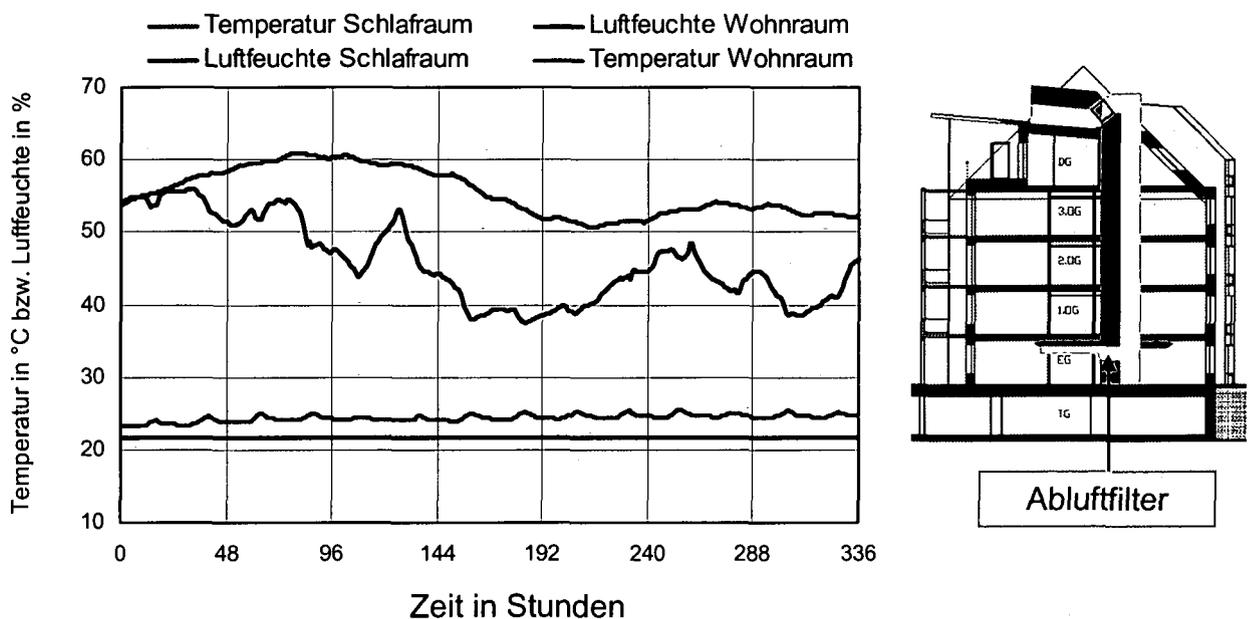


Abb. 78 Abluftfilter der Überström- und Abluftzone

Im Abluftfilter der Abluftzone steigt die Luftfeuchtigkeit in dieser Variante auf im Mittel ca. 55,5 % an und steigt somit um ca. 0,8 % gegenüber der Variante ohne Nachtschaltung an.

4.3.5 Ergebnisse Sommer

Die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten wurden bei den Varianten für den Sommer vom 7. bis zum 21. Juli mit den Klimadaten von Wien des Jahres 1997 berechnet. Den Berechnungsperioden ging jeweils eine einwöchige Einschwingphase voraus.

4.3.5.1 Sommer Anlage und Fenster

Bei Variante Sommer Anlage und Fensterlüftung erfolgt die Be- und Entlüftung der Räumlichkeiten über die Lüftungsanlage mit einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$. Die Fenster werden im Schlafraum viermal am Tag für jeweils 60 Minuten gekippt und im Wohnraum in der Nacht 12 Stunden lang vollständig geöffnet.

In der folgenden Abbildung sind die durch die Fensterlüftung verursachten Luftwechsel im Schlafraum vom 7. bis zum 21. Juli dargestellt.

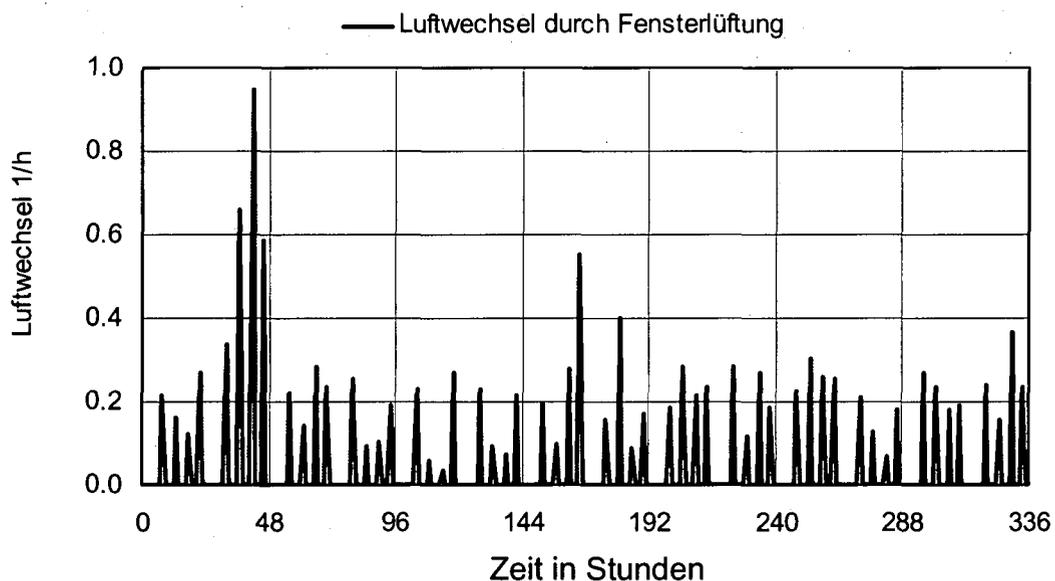


Abb. 79 Luftwechsel im Schlafraum durch viermaliges Fensterkippen pro Tag

Die mittlere Luftwechselzahl im Schlafraum während der Zeiten an denen ein Fenster gekippt ist, beträgt ca. $0,22 \text{ h}^{-1}$.

In der folgenden Abbildung sind die durch die Fensterlüftung verursachten Luftwechsel im Wohnraum vom 7. bis zum 21. Juli dargestellt.

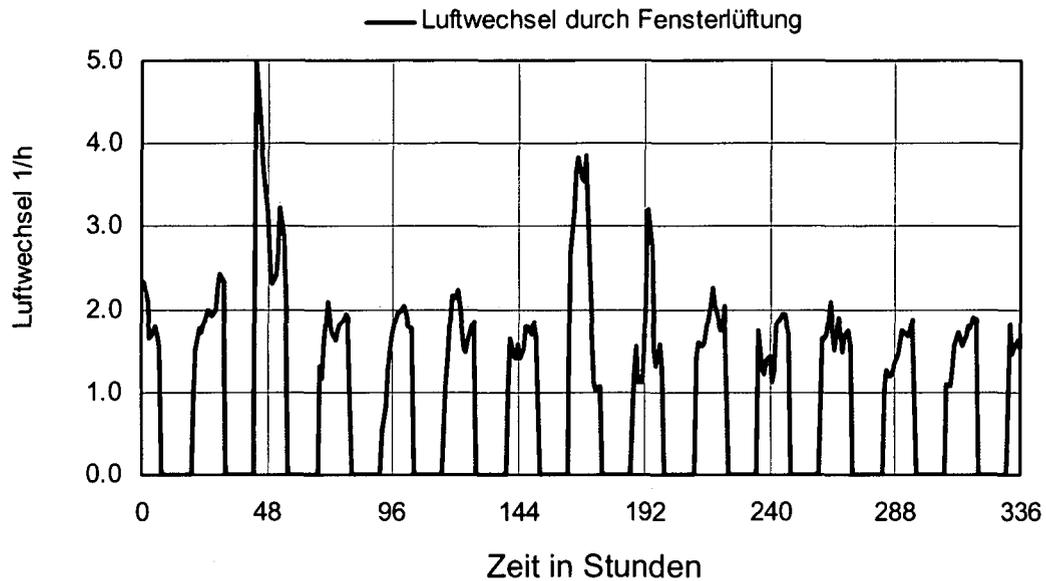


Abb. 80 Luftwechsel im Wohnraum durch viermaliges Fensterkippen pro Tag

Die Fenster im Wohnraum sind von 19.00 bis 7.00 Uhr geöffnet. Die mittlere Luftwechselzahl während in diesen Zeiten beträgt ca. $1,80 \text{ h}^{-1}$.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten des Außenbereichs vom 7. bis zum 21. Juli dargestellt.

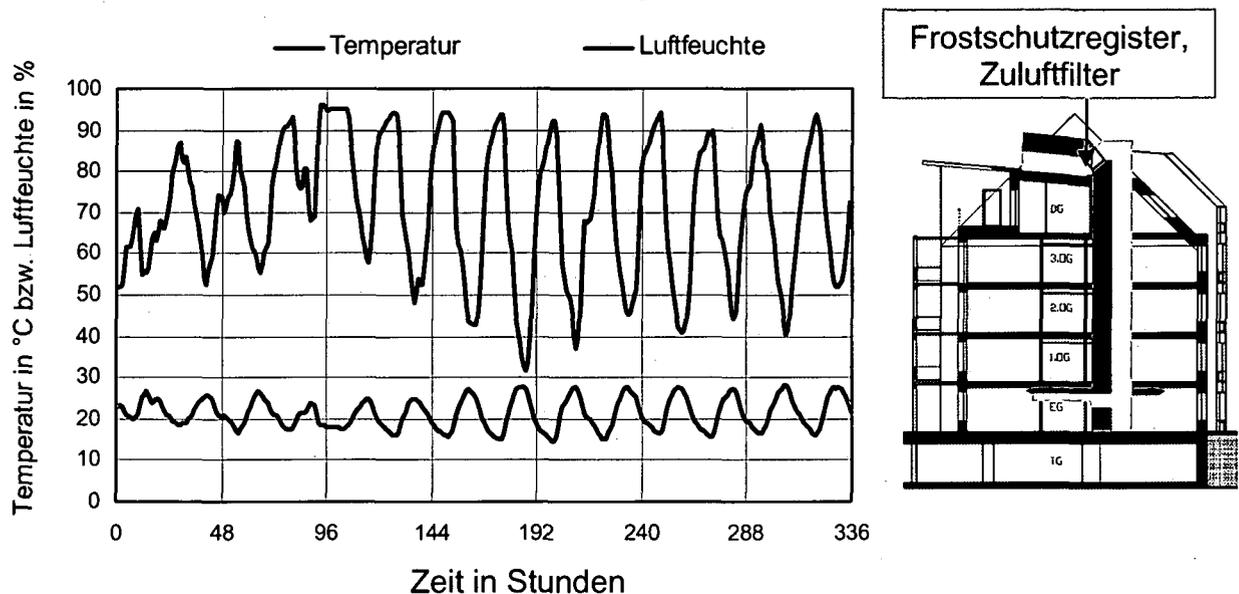


Abb. 81 Außenverhältnisse, Frostschutzregister und Zulufffilter

Die Bedingungen am Frostschutzregister und am Zulufffilter sind gleich wie die Außenbedingungen.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen gegen die Luftfeuchtigkeit am Zuluftfilter vor und am Zuluftfilter nach dem Wärmetauscher (WT) dargestellt.

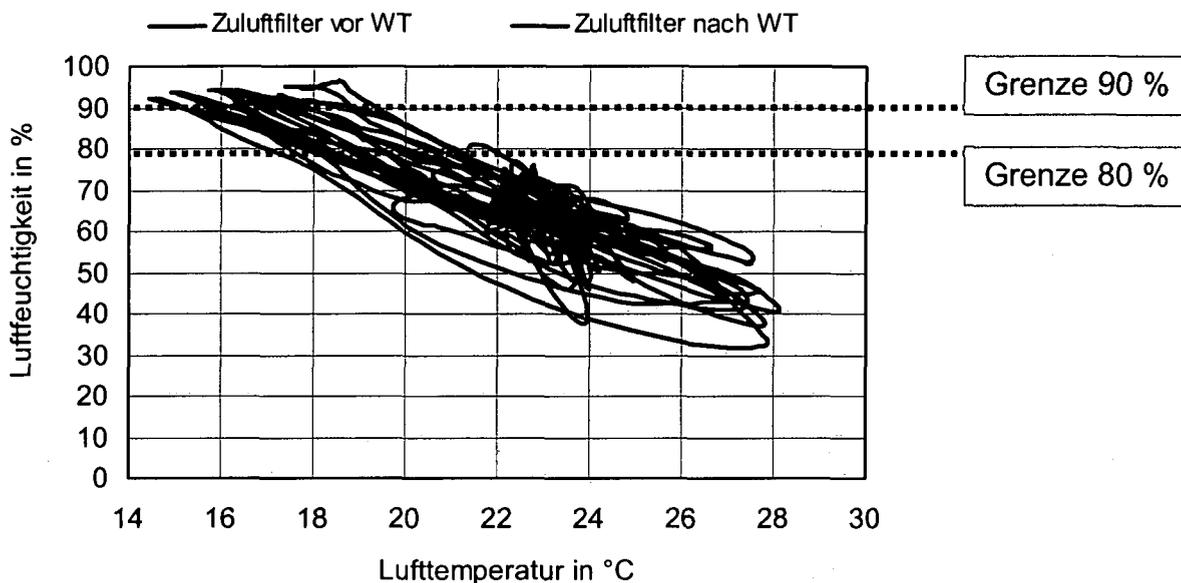


Abb. 82 Luftfeuchtigkeit gegen Lufttemperaturen an den Zuluftfilter

Die Grenze von 80 % Luftfeuchtigkeit wird am ersten Zuluftfilter nicht länger als drei Tage überschritten. Allerdings wird die Grenze von 90 % Luftfeuchtigkeit in dieser Periode nicht eingehalten. Die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter nach dem Wärmetauscher liegen im unbedenklichen Bereich.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli im Zuluft- und Ablufthauptstrang dargestellt.

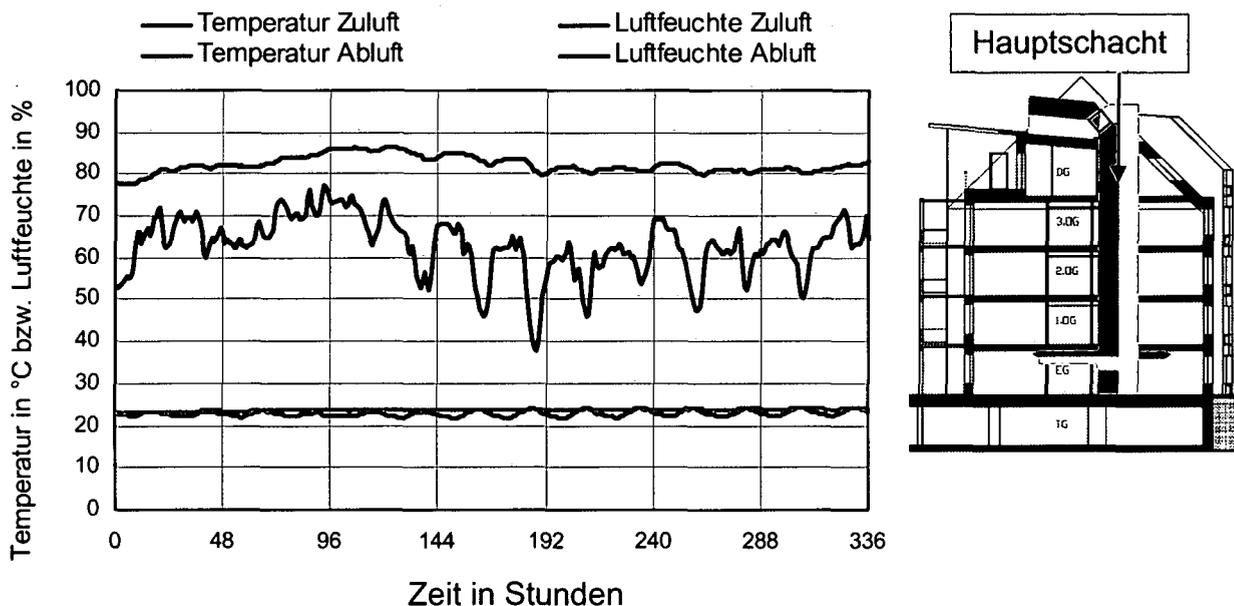


Abb. 83 Zuluft- und Ablufthauptstrang

Wie aus vorhergehender Grafik ersichtlich stellen sich in den Leitungen im Hauptschacht Temperatur zwischen ca. 22 und 25 °C ein. Die mittlere Luftfeuchtigkeit der

Zuluft beträgt in dieser Periode ca. 62,9 %. Die Verhältnisse im Filter nach dem Wärmetauscher entsprechen denen im Zuluft Hauptstrang. Die Abluft weist eine Luftfeuchtigkeit von im Mittel ca. 82 % auf.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli im Schalldämpfer des Zuluftstranges in der Wohnung dargestellt.

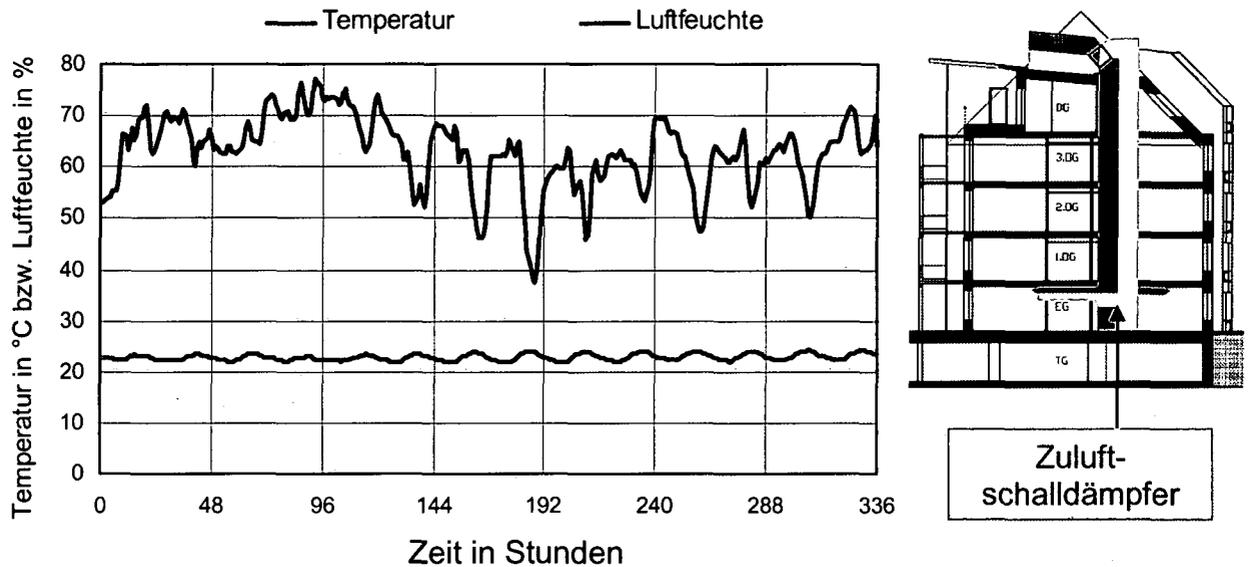


Abb. 84 Schalldämpfer des Zuluftstranges in der Wohnung

Die Temperatur im Schalldämpfer liegt im Mittel bei 22,8 °C.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli im Wohn- und im Schlafräum dargestellt.

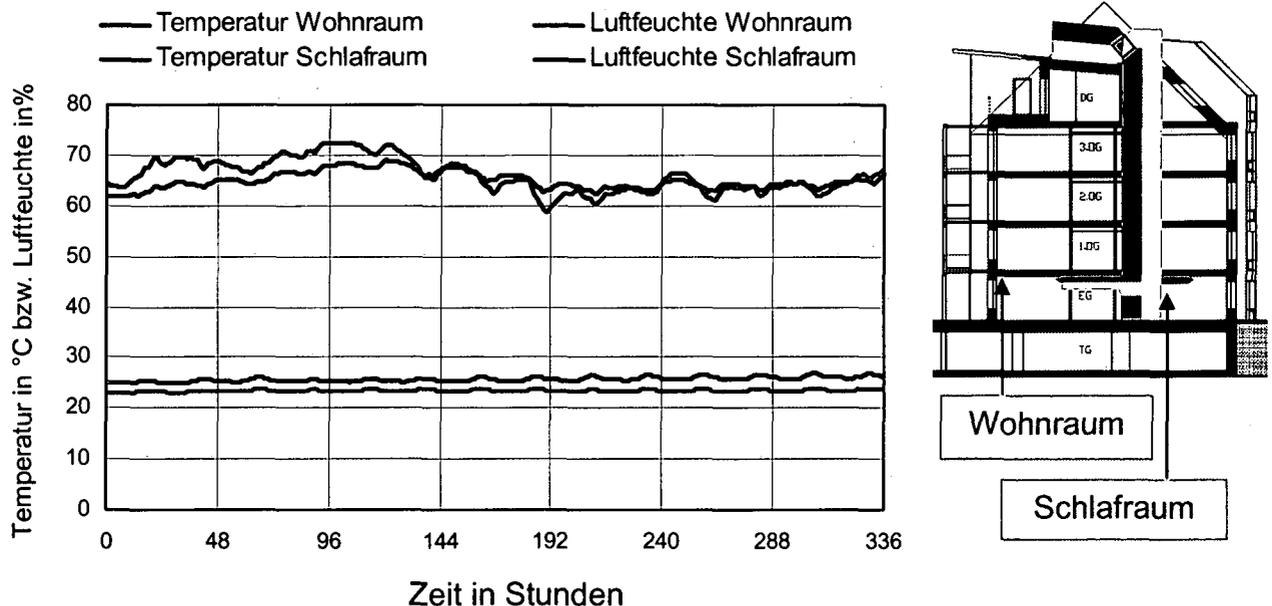


Abb. 85 Wohn- und Schlafräum

Im Schlafräum stellt sich eine mittlere Temperatur von ca. 23,4 °C und eine Luftfeuchtigkeit von ca. 65 %. Im südseitige Wohnraum ergeben sich Temperaturen

zwischen und 24,8 °C und 26,8 °C. Die Luftfeuchtigkeit schwankt zwischen 58,6 % und 72,5 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli in der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

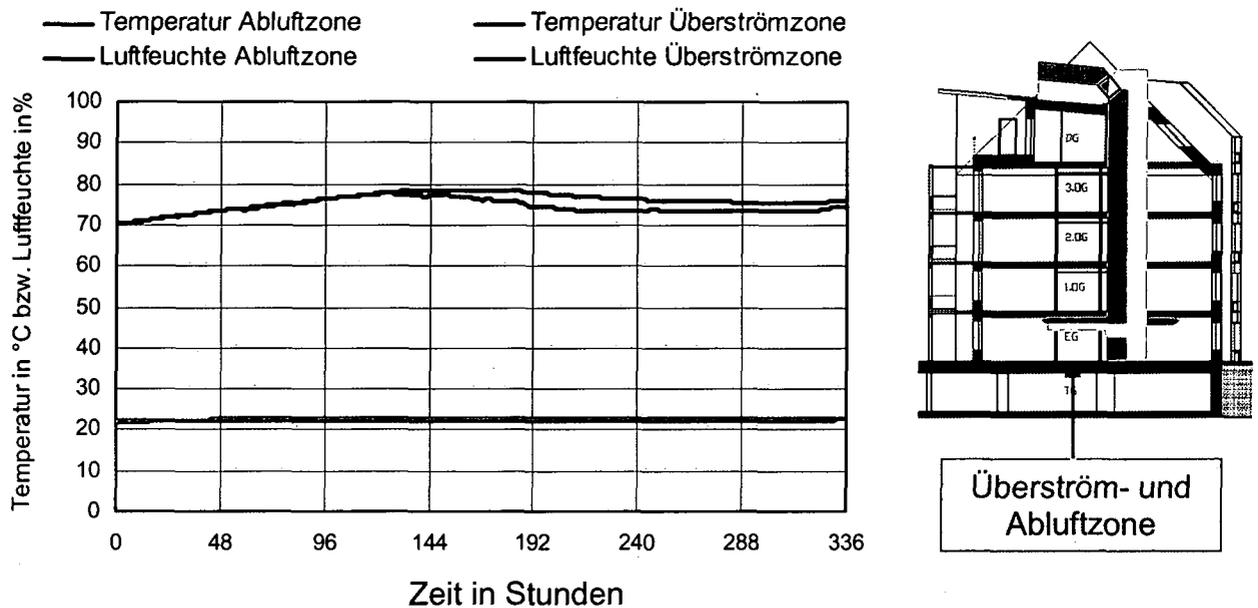


Abb. 86 Überström- und Abluftzone

In den Räumlichkeiten stellen sich in der betrachteten Periode Luftfeuchtigkeiten zwischen etwa 70 und 80 % ein. Die Temperaturen liegen im Mittel bei 22,6 °C in der Überströmzone und bei 23,4 °C in der Abluftzone.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli in den Abluftfiltern der Überström- und der Abluftzone dargestellt.

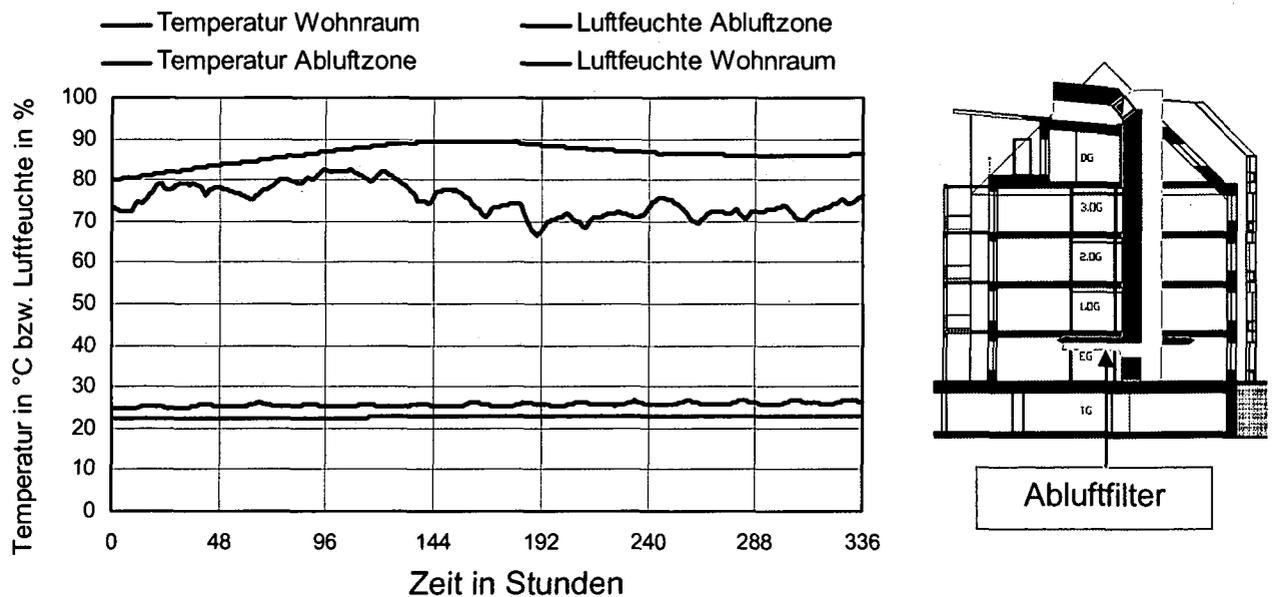


Abb. 87 Abluftfilter der Überström- und Abluftzone

Die Luftfeuchtigkeit im Abluftfilter in der Abluftzone beträgt im Mittel 86,4 %. In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli im des Schalldämpfers der der Wohnung im Abluftstrang dargestellt.

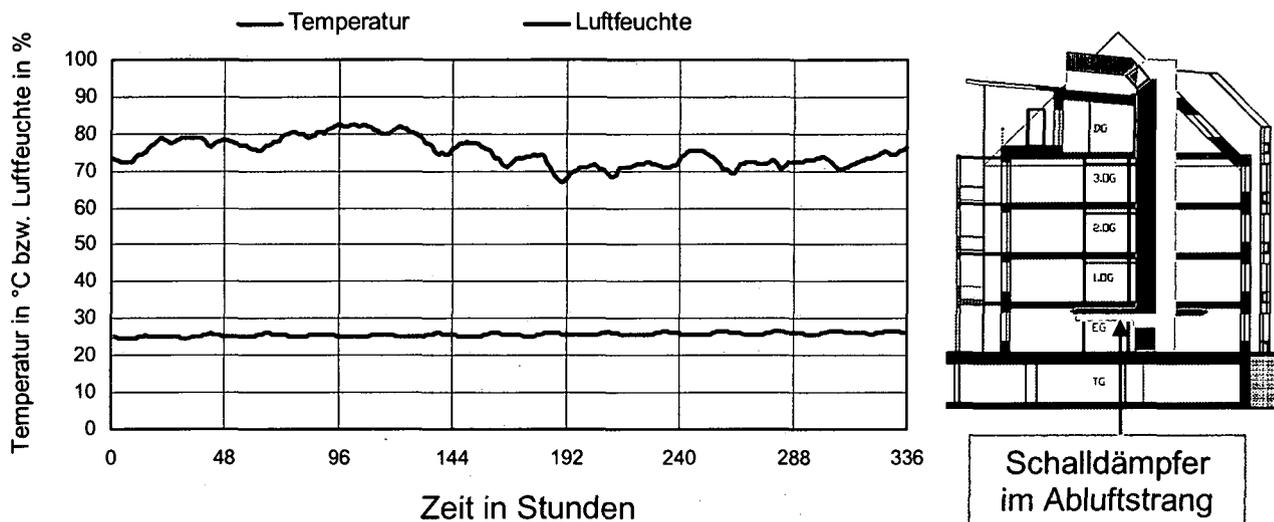


Abb. 88 Schalldämpfer im Wohnungsabluftstrang

Der Mittelwert der Luftfeuchtigkeit liegt bei ca. 75 %.

In der folgenden Abbildung sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeiten vom 7. bis zum 21. Juli im des Filters im Abluftstrang vor dem Wärmetauscher dargestellt.

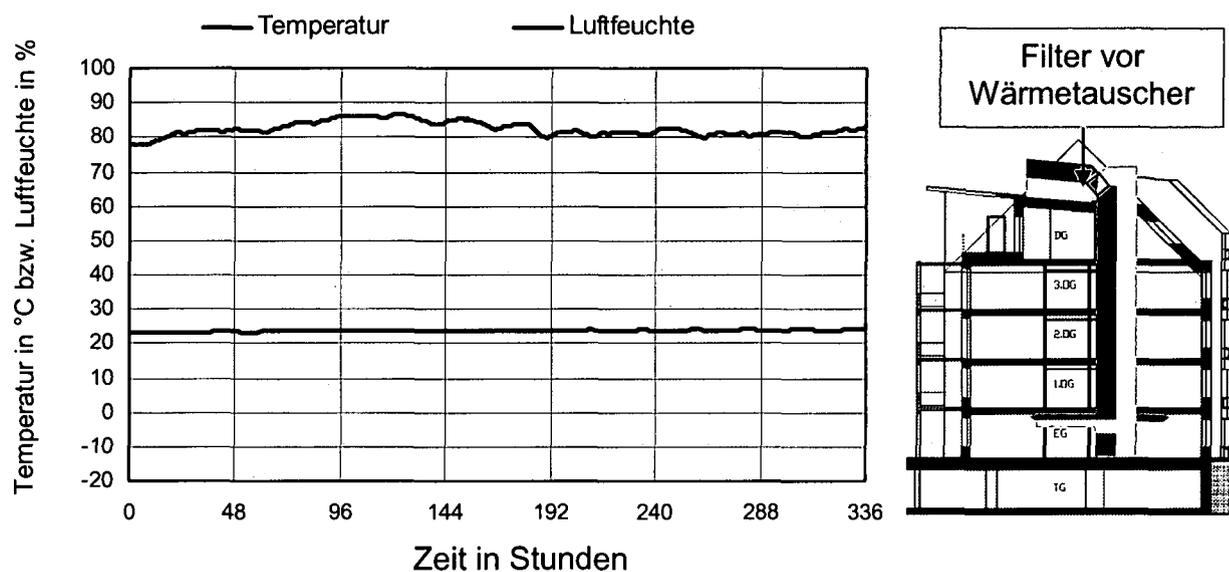


Abb. 89 Filter vor Wärmetauscher

Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Filter vor dem Wärmetauscher liegt in der Periode bei 83,3 %.

4.3.5.2 Interpretation der Ergebnisse

Nach [VDI02] müssen die Zuluftfilter anlagen- und regelungstechnisch insofern abgesichert werden, dass die relative Feuchte an den Filtern den Wert von 90 % nicht überschreitet und dass die durchschnittliche relative Feuchte innerhalb von drei Tagen nicht höher als 80 % liegt.

In der untersuchten Winterperiode überschreiten die Luftfeuchtigkeiten am Filter vor dem Wärmetauscher die Grenze von 90 %. Die Grenze von 80 % Luftfeuchtigkeit wird an diesem Filter länger als drei Tage überschritten. In allen Bauteilen nach dem Wärmetauscher ist die Temperatur ausreichend hoch, um bei gleich bleibender absoluter Feuchte die Luftfeuchtigkeit unter den erforderlichen Grenzen zu halten.

Die Außenluftfeuchtigkeiten in der Übergangsperiode und im Sommer verursachen am ersten Zuluftfilter ein Überschreiten der Grenze von 90 %. Eine Luftfeuchtigkeit von durchgehend über 80 % innerhalb von drei Tagen wird nicht mehr überschritten.

Da die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter vor dem Wärmetauscher die zulässige Grenze überschreiten, ist das Verwenden einer zweiten Filterstufe nach dem Wärmetauscher notwendig.

In [FEI99a] werden die Qualitäten für Außenluftfilter mit mindestens Filterklasse F7 und für Abluftfilter mit mindestens G3 angegeben. Auch von [KEU97] werden auf der Zuluftseite grundsätzlich zwei Filterstufen empfohlen, wobei in der ersten Stufe mindestens ein Filter Klasse F5, wenn möglich F7 und in der zweiten Filterstufe ein Filter mindestens F7, wenn möglich F9, eingesetzt werden sollen. Die Einteilung der Filter in verschiedene Filterklassen erfolgt gemäß [DIN94a] in Abhängigkeit der Abscheidegrade bei verschiedenen Partikelgrößen.

Zur Filterung der Zuluft werden im Projekt Utendorfgasse zwei Filter verwendet. Ein Filter der Klasse F7 vor dem Wärmetauscher und ein Filter der Klasse F9 nach dem Zuluftventilator, um eine entsprechende Zuluftqualität zu gewährleisten. [ANW03]

4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel wurde eine Methode zum Nachweis der hygienischen Tauglichkeit von Lüftungsanlagen beschrieben. Mittels der durchgeführten thermischen und hygri-schen Simulation konnten die Luftfeuchtigkeiten und die Temperaturen in allen Bauteilen der Lüftungsanlage und in den Räumlichkeiten berechnet werden. Mit den Ergebnissen für die Luftfeuchtigkeiten wird die Einhaltung der Grenzen an den Zuluftfiltern von VDI 6022 nachgewiesen.

Mit dem erstellten Simulinkmodell wurde am Beispiel eines mehrgeschossigen Passivhauses die Lüftungsanlage auf ihre Tauglichkeit in hygienischer Hinsicht untersucht.

Die Luftfeuchtigkeiten am Zuluftfilter vor dem Wärmetauscher überschreiten die zulässige Grenze. Daher ist bei der untersuchten Lüftungsanlage das Verwenden einer zweiten Filterstufe nach dem Wärmetauscher, an der die Grenzen eingehalten werden, notwendig.

- [ANW03] Bauer, P., Dreyer, J., Kuzmich, F., Schöberl, H., Steininger, C.: Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau, Endbericht, Impulsprogramm „Haus der Zukunft“, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, 2003
- [ASH97] Ashrae Handbook, Fundamentals; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1997
- [BED02] Bednar, T.: Schriftenreihe Bauphysik, Heft 6: Dokumentation des Programms BUILDOPT zur Optimierung von Multizonengebäuden, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik, TU Wien, 2002,
- [BOW03] Bauordnung für Wien, Land Wien, 2003
- [BRU90] Brundrett, G. W.: Criteria for Moisture Control, Butterworth & CO. Ltd, 1990
- [COC79] Cockroft, J.P.: Heat transfer and air flow in bulidings, PhD thesis, University of Glasgow, 1979
- [DES02] Deseyve, C.: Risk Assessment in Passivhaussystemen im sozialen Wohnbau, Diplomarbeiten am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik, TU Wien, 2002
- [DIN94] DIN 1946-2: Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen, Ausgabe:1994-01, Deutsches Institut für Normung, 1994
- [DIN94a] DIN EN 779: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik; Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung, Ausgabe 09/94, Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1994
- [ENI98] EN ISO 389-8: Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung von audiometrischen Geräten, Europäisches Komitee für Normung, 1998
- [DIN95] DIN ISO 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit (ISO 7730:1994), Deutsches Institut für Normung, 1995
- [ESR02] ESP-r, Version 9, ESRU Home Page: www.esru.strath.ac.uk, ESRU, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, 2002
- [FAN70] Fanger P. O.: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- [FEI96] Feist W.: Lüftung im Passivhaus, Protokollband Nr. 4, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhausinstitut Deutschland, Darmstadt, 1996, S. III/5

- [FEI98] Feist, W.: Passivhausfenster, Protokollband Nr. 14, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1998
- [FEI98a] Feist, W.: Lüftung im Passivhaus, Protokollband Nr. 4, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1998
- [FEI98c] Feist, W.: Energiebilanzen mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser - Phase II Protokollband Nr. 13, Darmstadt 1998
- [FEI99] Feist, W.: Qualitätssicherung beim Bau von Passivhäusern, Protokollband Nr. 18, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1999
- [FEI99a] Feist, W.: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Protokollband Nr. 17, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1999
- [FEI99b] Feist, W.: Wärmebrückenfreies Konstruieren, Protokollband Nr. 16, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 1999
- [FEI00] Feist, W.: Passivhaus Projektierungspaket '99, Fachinformation PHI – 1999/1, Passivhaus Institut, 2000
- [FEI02] Feist, W.: Passivhaus-Projektierungs-Paket 2002, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2002
- [GER99] Gertis, K.: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1+2: Glas-Doppelfassaden (GDF), Bauphysik 21, Heft 2, Ernst & Sohn, 1999
- [HAG01] Hagentoft, C. E.: Thermal System Analysis using the Building Physics Toolbox in Simulink, Department of Building Physics, Chalmers University Göteborg, Schweden, 2001
- [HDZ02] Dreyer, J., Kautsch, P., Meile, W., Streicher, W.: Thermisch-hygrisches Verhalten von Glasdoppelfassaden unter solarer Einwirkung- Theorie-evaluierung durch Vorortmessung, Endbericht, Impulsprogramm „Haus der Zukunft“, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, 2002
- [HEN91] Hensen, J.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating systems, Technische Universität Eindhoven, 1991
- [HEN93] Hensen, J., van der Maas, J., Roos, A.: Air and Heat flow through Large Vertical Openings, Technische Universität Eindhoven, 1993
- [KEL97] Keller, B.: Klimagerechtes Bauen, Grundlagen - Dimensionierung – Beispiele, Teubner Verlag, 1997

- [KEU97] Keune A.: Hygiene in der Raumluftechnik – Technische Lösungen in der Planung und Ausführung, VDI Bericht 1318, VDI Verlag, 1997
- [KOL96] Kolmetz, S., Rouvel, L.: Einsatzbedingungen für RLT-Anlagen, Arbeitsbericht zum Arbeitsschwerpunkt 1.1 des Forschungsvorhabens SANVIREV, Technische Universität München, 1996
- [LAN00] Lang, W.: Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie, Dissertation, Institut für Entwerfen und Bautechnik, Technische Universität München, 2000
- [LAN03] Land Wien: Landesgesetzblatt für Wien, ausgegeben am 21.2.2003, 10.Stück, Wien, 2003
- [MAS95] Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung, Dissertation, Universität Kassel, 1995
- [MAT01] The MathWorks, Inc.: Matlab, Simulink, Version 6, Home Page: mathwork.com, USA, 2001
- [MÖR01] Möritz M., Peters H., Nipko B., Wesit K., Rüden H.: Mikroorganismen und Endotoxine in Raumluftechnischen Anlagen, in Gesundheitsingenieur – Hautechnik – Bauphysik – Umwelttechnik 122 (2001) Heft 1
- [ONO83] ÖNORM M 7500: Heizlast von Gebäuden, Österreichisches Normungsinstitut, 1983
- [ONO89] ÖNORM H 6000-3: Lüftungstechnische Anlagen, Grundregeln, hygienische und physiologische Anforderungen für den Aufenthaltsbereich von Personen, Österreichisches Normungsinstitut, 1989
- [ONO95] ÖNORM B1801-1: Kosten im Hoch- und Tiefbau, Kostengliederung, Österreichisches Normungsinstitut, 1995
- [ONO98] ÖNORM EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfes – Wohngebäude, Europäisches Komitee für Normung, 1998
- [ONO99] ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau - Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse, Österreichisches Normungsinstitut, 1999
- [ONO00] ÖNORM EN ISO 13786: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen, Dynamisch-thermische Kenngrößen, Berechnungsverfahren, Österreichisches Normungsinstitut, 2000

- [ONO01] Vorschlag ÖNORM B 8115-2: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Anforderungen an den Schallschutz, Österreichisches Normungsinstitut, 2002
- [OES97] Oesterle, E., Fischer, C., Lieb, R.: Doppelfassaden – Technik für Planer. Die doppelte Haut unter der Lupe, 1997
- [REC00] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, R. Oldenburg Verlag München Wien, 2000
- [RIE94] Rietschel, H.: Raumklimatechnik, Band 1 Grundlagen, Springer-Verlag, 1994
- [RIK02] Rickenbach + Wiget AG, Homepage: www.riwag.ch, Arth, Schweiz 2002
- [ROH01] Rohracher, H., Kukovetz, B., Ornetzeder, M., Zelger, T., Enzensberger, G., Gadner, J., Buber, R.: Akzeptanzverbesserung bei Niedrigenergiehaus-Komponenten, „Haus der Zukunft“ Forschungsprojekt, Graz, 2001
- [ROV00] Rouvel, L., Deutscher, P., Elsberger, M.: Sommerlicher Wärmeschutz, Eine einheitliche Methodik für die Anforderungen an den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz, Bauphysik 22, Ernst & Sohn, 2000
- [VEL01] IFT - Rosenheim: Kurzfassung zu Prüfbericht Nr. 403 21980/9 vom 9. Juli 2001 für Firma Velux, IFT -Rosenheim, Rosenheim 2001
- [VDI02] VDI 6022 Blatt 3: Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen in Gewerbe- und Produktionsbetrieben, VDI-Richtlinie, Verein Deutscher Ingenieure 2002

LEBENS LAUF

Persönliche Daten:

Name:	Christian Jachan
Geburtsdatum:	4. 1. 1976
Geburtsort:	Krems an der Donau
Wohnort	Bergstrasse 30, 3542 Gföhl
Staatsangehörigkeit:	Österreich

Ausbildungsweg:

Volksschule Gföhl	1982 bis 1986
Sporthauptschule Gföhl	1986 bis 1990
Höhere Technische Bundeslehranstalt Krems, Abteilung Hochbau	1990 bis 1995, Abschluss 06.1995
Studium an der TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Studienzweig: Konstruktiver Ingenieurbau	1996 bis 2001, Abschluss 10.2001 Diplomarbeitsthema: „Bauphysikalische Performanceberechnung am Beispiel von Holzbauten“
Doktoratsstudium am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik	2001 bis 2003

Berufliche Tätigkeit:

Baufirma Buhl, Gars/K.	1995, 5 Monate
Baumeister Ing. Kramer, Krems/D.	1996, 8 Monate
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz	ab 07.2001