



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss
von Wärmedämmverbundsystemen auf das Sommerverhalten
von Gebäuden bei gemäßigttem bis subtropischem Klima**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic

E 206

Institut für Hochbau und Technologie

Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Simon Handler

Matr.Nr.: 0530094

Kaiserbrunnngasse 4c/3/20, 2700 Wiener Neustadt

Wien, Februar 2011

Danksagung

Ich möchte mich beim Team des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien rund um...

Ao.Univ.Prof. Dipl. Ing. Dr. Thomas Bednar

... für die umfassende Betreuung dieser Diplomarbeit bedanken.

Mein Dank gilt auch der Firma Austrotherm GmbH, die das Zustandekommen der Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit unterstützt bzw. ermöglicht hat.

Kurzfassung

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen auf das Sommerverhalten von Gebäuden bei gemäßigttem bis subtropischem Klima

In der vorliegenden Diplomarbeit werden Wärmedämmverbundsysteme auf deren Potenzial zur Beschränkung der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden in unterschiedlichen Klimaregionen mit experimentellen und numerischen Methoden untersucht.

Im Rahmen des an einem Institutsgebäude durchgeführten Experiments werden die Wärmetransportprozesse durch eine Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem und durch eine Außenwand ohne Wärmedämmverbundsystem mit einer Messanlage bestehend aus Wärmestrommessfolien, sowie Temperatur- und Strahlungssensoren erfasst. Nach Abschluss der Messungen werden die gewonnenen Daten analysiert und mit den Ergebnissen einer thermischen Bauteilsimulation der Außenwand verglichen.

Im Anschluss werden dynamische Gebäudesimulationen für verschiedene Klimasituationen durchgeführt. Für eine festgelegte Gebäudegeometrie wird der Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen auf die sich einstellenden Innenraumtemperaturen untersucht. Es wird speziell darauf eingegangen, ob temperatursenkende Maßnahmen (nächtliches Dauerlüften, Verschattung der Fensterflächen) an Außenwänden mit Wärmedämmverbundsystemen ähnlich hohe Wirkung zeigen wie an Außenwänden ohne Wärmedämmverbundsysteme.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich Wärmedämmverbundsysteme positiv auf die maximalen, sommerlichen Innenraumtemperaturen auswirken, wenn das nächtliche Belüften der Räume von den Benutzern eines Gebäudes konsequent ausgeführt wird. Ist dies nicht der Fall, steigt die Raumtemperatur in einem Gebäude mit Wärmedämmverbundsystem stärker an als in einem Gebäude ohne Wärmedämmverbundsystem. Umso höher die Außenlufttemperaturen an einem Gebäudestandort sind, umso günstiger wirkt sich ein Wärmedämmverbundsystem auf die Innenraumtemperaturen eines Gebäudes aus.

Abstract

Experimental and numerical research into the influence of thermal insulation composite systems on the summer performance of buildings for moderate to subtropical climate

In this master's thesis the potential of thermal insulation composite systems to reduce the overheating of buildings during summertime is researched by experimental and numerical methods.

The experiment is carried out to explore how the heat transport processes through an exterior wall are affected by the installation of a thermal insulation composite system. As part of the preparation for the experiment, an exterior insulation layer is installed on part of the facade of a building. The heat transport processes through the wall are then detected by a measuring system consisting of heat flow sensors, temperature sensors and radiation sensors. Afterwards the collected data is getting analyzed and compared to the results of a thermal simulation of the investigated part of the exterior wall.

If the obtained knowledge is valid for various outside temperatures, is then verified by performing dynamic, thermal simulations of a defined building located in different climatic situations. The other topic that is investigated by the thermal building simulations is the effect of operations that may reduce indoor temperatures (e.g. constant airing over open windows during night, using shading systems for the windows) and the used wall constructions on the room temperatures that actually occur.

The conducted research shows, that the installation of a thermal insulation composite system has positive effects on the maximum room temperatures, if the occupants of a building open their windows during night consistently. Temperatures may increase strongly in buildings with a thermal insulation composite system if it is impossible to open the windows. The higher the outside temperature at a specific location is, the more positive is the effect of a thermal insulation composite system on the occurring room temperatures.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Grundlagen.....	1
2.1.	Definition - Wärmedämmverbundsystem (WDVS).....	2
2.2.	Physikalische Grundlagen.....	3
2.2.1.	Wärmestrom	3
2.2.2.	Wärmestromdichte	4
2.2.3.	Wärmetransport	4
2.2.4.	Stationärer Wärmetransport.....	5
2.2.5.	Instationärer Wärmetransport.....	6
2.2.6.	Wärmeleitfähigkeit	6
2.2.7.	Wärmedurchlasswiderstand	7
2.2.8.	Wärmeübergangskoeffizient.....	8
2.2.9.	Wärmeübergangswiderstand	8
2.2.10.	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert).....	9
2.2.11.	Wärmetransportprozesse innerhalb einer thermischen Zone	10
2.2.11.1.	Wärmetransport durch opake Bauteile	10
2.2.11.2.	Wärmeeintrag durch Personen und Geräte.....	11
2.2.11.3.	Wärmeeintrag über transparente Flächen.....	12
2.2.11.4.	Wärmetransport durch Luftwechsel.....	12
2.3.	Normative Grundlagen zum Sommerverhalten von Gebäuden	13
2.3.1.	ÖNORM EN 15251	13
2.3.2.	ÖNORM B 8110-3.....	16
2.3.2.1.	Normative Grenztemperaturen t^*	16
2.3.2.2.	Nachweis über den Tagesverlauf der Raumtemperatur	16
2.3.2.3.	Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse	17
2.3.3.	ÖNORM EN ISO 13791	19
2.3.4.	ÖNORM EN ISO 13792	21
3.	Fragestellung für die experimentellen bzw. numerischen Untersuchungen.....	22
4.	Auswahl der Forschungsmethode und Begründung	22

5.	Experimentelle Untersuchung.....	23
5.1.	Aufbau des Experiments	23
5.1.1.	Örtliche Gegebenheiten	23
5.1.2.	Wandaufbau ohne WDVS	25
5.1.3.	Wandaufbau mit WDVS	26
5.1.3.1.	Materialien.....	27
5.1.4.	Installation der Messanlage.....	31
5.1.4.1.	Temperatursensor PT100 / PT1000.....	31
5.1.4.2.	Wärmestrommessplatte.....	31
5.1.4.3.	Pyranometer CM 3	31
5.1.4.4.	Pyrradiometer.....	32
5.1.4.5.	Anordnung der Messgeräte	32
5.2.	Versuchsablauf	36
5.3.	Analyse der Messdaten.....	36
5.3.1.	Analyse anhand der gemessenen Temperaturen.....	37
5.3.2.	Analyse anhand der gemessenen Wärmeströme.....	41
6.	Numerische Untersuchung.....	50
6.1.	Bauteilsimulation.....	52
6.1.1.	Bauteilsimulationsprogramm HAM3D.....	53
6.1.2.	Analyse der Ergebnisse aus der Bauteilsimulation	55
6.1.3.	Berechnung der effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten (U_{eff})	57
6.1.3.1.	Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{eff,sim}}$	59
6.1.3.2.	Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{eff,calc}}$	60
6.2.	Gebäudesimulation	64
6.2.1.	Simulationsprogramm Buildopt	66
6.2.2.	Virtuelles Gebäude für die Simulation mit Buildopt.....	67
6.2.2.1.	Gebäudegeometrie.....	67
6.2.2.2.	Wandaufbauten	68
6.2.2.3.	Fensterqualität und Fenstergröße.....	73
6.2.2.4.	Nutzung des Gebäudes	74

6.2.3.	Klimatische Bedingungen an Simulationsstandorten	75
6.2.4.	Analyse der maximalen operativen Raumtemperaturen	78
6.2.5.	Analyse der durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen während der Sommermonate	80
6.2.6.	Analyse des zeitlichen Verlaufs der operativen Raumtemperaturen ...	81
6.2.7.	Häufigkeitsverteilung von auftretenden Raumtemperaturen	89
6.2.8.	Klassifizierung nach ÖNORM EN 15251 [ONO07]	91
7.	Zusammenfassung	95
8.	Abbildungsverzeichnis	97
9.	Tabellenverzeichnis	102
10.	Literaturverzeichnis	103

1. Einleitung

„Das Anbringen eines Wärmedämm-Verbundsystems verbessert den winterlichen Wärmeschutz durch Verminderung der Transmissionswärmeverluste über die Außenwände. [...] Zugleich dient ein Wärmedämm-Verbundsystem auch dem sommerlichen Wärmeschutz, indem es tagsüber eine zu starke Aufheizung der Räume verhindert.“ [NEU09]

Während die Wirkung von Wärmedämmverbundsystemen bei winterlichen Temperaturen zur Senkung des Heizenergiebedarfs unbestritten ist, ist die Frage nach der Sinnhaftigkeit einer zusätzlichen Dämmschicht für den sommerlichen Betrieb nicht so trivial zu beantworten. Die großen Außentemperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht im Sommer machen instationäre Rechenmethoden erforderlich. Diese sind wesentlich aufwendiger und komplizierter und werden aus diesem Grund oft umgangen. Gerade für südliche Gegenden spielt der sommerliche Wärmeschutz jedoch eine bedeutende Rolle. In diesen Gebieten wird häufig mehr Energie zum Kühlen der Gebäude als zum Heizen aufgewendet.

Die genannten Gründe rechtfertigen es, nach neuen Möglichkeiten zur Begrenzung der sommerlichen Überwärmung zu forschen bzw. den Wirkungsgrad vorhandener Technologien festzustellen, um diese sinnvoll einsetzen zu können.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es die Wirksamkeit von Wärmedämmverbundsystemen zur Vermeidung oder zumindest Begrenzung der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden besser beurteilen zu können. Außerdem soll untersucht werden, ob die gewonnenen Erkenntnisse für verschiedene Klimaregionen zutreffend sind.

2. Grundlagen

Der Wärmeschutz von Gebäuden stellt aus mehreren Gründen ein äußerst wichtiges Thema im Bauwesen dar. Nicht nur die Möglichkeit der Einsparung von Rohstoffen und Energie, sondern auch die Schonung der Umwelt, sowie das Wohlbefinden des Menschen sind von großer Bedeutung. Fehlender oder mangelhafter Wärmeschutz kann außerdem zu Schädigungen der Tragstruktur führen. Man denke dabei an die aus Temperaturschwankungen resultierenden Spannungen in Bauteilen [BLA02].

Für den sommerlichen Wärmeschutz ist neben der Einsparung von Energie und Geld und somit der Schonung der Umwelt, besonders das Wohlbefinden der Nutzer eines Gebäudes von großem Interesse.

Um das Wohlbefinden oder auch Behaglichkeitsgefühl der Bewohner eines Gebäudes sicherzustellen, müssen laut Bläsi [BLA02] verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein:

- Raumtemperatur zwischen 20 und 22°C
- Oberflächentemperatur der Wände mindestens 16 bis 18°C
- die raumumschließenden Wände müssen Wärme speichern können
- Fußbodentemperatur zwischen 22 und 24°C
- relative Luftfeuchtigkeit zwischen 50% und 60%
- Luftbewegung kleiner 0,2 m/s um Zugerscheinung zu vermeiden

Bei den angegebenen Werten spielt auch die Tätigkeit des Menschen eine Rolle (z.B.: sitzen, gehen, usw.).

Es lässt sich somit erkennen, dass die Temperaturen innerhalb eines Gebäudes großen Einfluss auf das Wohlbefinden der darin lebenden Menschen haben. In der Literatur sind verschiedenste Ansätze zur Einhaltung der geforderten Raumtemperaturen zu finden. In dieser Arbeit wird die Verbesserung der Außenwände durch Herstellung eines Wärmedämmverbundsystems auf die Wirksamkeit zur Begrenzung der sommerlichen Raumtemperaturen untersucht.

Um die auftretenden Wärmetransportprozesse und die damit in Zusammenhang stehenden Phänomene nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die nötigen Grundlagen erarbeitet.

2.1. Definition - Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Wärmedämmverbundsysteme (im Folgenden kurz WDVS genannt) stellen heute eine Standardmaßnahme zur Verringerung der Wärmeverluste von Fassaden dar. Aufgrund ihres günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses zählen sie zu den am häufigsten verwendeten Dämmsystemen im Neu- und Altbaubereich.

Durch die Herstellung eines WDVS werden die Transmissionsverluste über die Außenwände reduziert. Im Winter führt dies zu einer Verminderung der Heizkosten.

Welchen Einfluss WDVS auf das sommerliche Verhalten von Gebäuden haben, soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

Ein WDVS ist ein Multikomponentenbausatz, in dem sehr unterschiedliche Materialien kombiniert sind. Der Begriff „Wärmedämmverbundsystem“ impliziert, dass die einzelnen Komponenten einen festen Verbund bilden. Auf die tragende Wandscheibe werden üblicherweise mittels Kleber und Dübeln das Dämmmaterial, der Unterputz mit Bewehrungsgewebe und der Oberputz angebracht.

Als Dämmstoffe können verschiedenste Materialien eingesetzt werden. Die gebräuchlichsten Dämmstoffe sind Polystyrol-Hartschaum und Mineralfaser. Wobei sich die Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit auf den Dämmstoff EPS (expandiertes Polystyrol) beschränken. Neben dem üblichen weißen EPS gibt es seit einiger Zeit auch mit Graphit versetzte, graue EPS Dämmstoffplatten. Diese zeichnen sich durch ein besseres Dämmverhalten aus. Der Graphitzusatz verringert die Strahlungsdurchlässigkeit des Dämmmaterials. In den experimentellen und numerischen Untersuchungen dieser Arbeit werden diese grauen EPS Dämmstoffplatten verwendet [NEU09].

2.2. Physikalische Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf das Problem der sommerlichen Überwärmung eingegangen. Um diese Problematik richtig erfassen zu können, müssen einige Begriffe definiert und Grundlagen erarbeitet werden.

2.2.1. Wärmestrom

Als Wärmestrom Φ wird die Wärmemenge bezeichnet, die pro Zeiteinheit transportiert wird. Der Wärmestrom wird in W angegeben [RIC08].

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Φ	Wärmestrom [W]
ΔQ	Wärmestromänderung [Ws]
Δt	Zeitänderung [s]

2.2.2. Wärmestromdichte

Bezieht man einen Wärmestrom auf eine Flächeneinheit, erhält man die Wärmestromdichte q . Die Einheit für die Wärmestromdichte ergibt sich somit zu W/m^2 [RIC08].

$$q = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A} \quad (2.2)$$

q	Wärmestromdichte [W/m^2]
$\Delta\Phi$	Wärmestromänderung [W]
ΔA	Flächenänderung [m^2]

2.2.3. Wärmetransport

Liegt ein Temperaturunterschied innerhalb eines Mediums vor, führt dieser stets zu dem Bestreben des Ausgleichs der Temperatur. Bereiche mit höherer Temperatur haben ein höheres Energieniveau als jene mit niedrigerer Temperatur. Kommt es nun zu einem Ausgleich der Energieniveaus, fließt Wärmeenergie vom wärmeren zum kälteren Medium. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1 dargestellt. [RIC08].

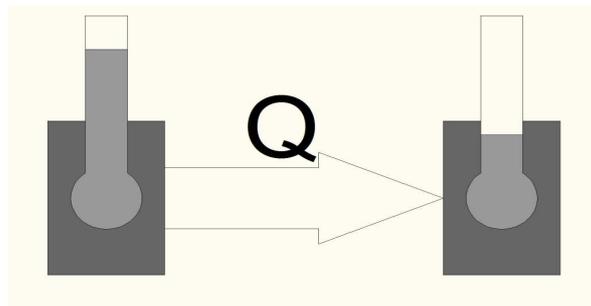


Abbildung 1: Wärmefluss [RIC08]

Grundsätzlich kann Wärmetransport auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- Wärmeleitung: Wärmeleitung ist ein materiegebundener Energietransport zwischen unmittelbar benachbarten Molekülen und somit hauptsächlich für feste Stoffe relevant. Das Gesetz von Wiedemann-Franz besagt, dass ein guter elektrischer Leiter auch eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweist. Folglich sind Metalle mit hoher elektrischer Leitfähigkeit gute Wärmeleiter. Auch die Aufnahmefähigkeit eines Materials von Wasser hat Einfluss auf dessen Wärmeleitfähigkeit.

- Konvektion: In Flüssigkeiten oder Gasen können die Teilchen ihre Lage verändern. Sie transportieren dabei die gespeicherte Energie an einen anderen Ort. Die Strömungen innerhalb der Materie entlang derer sich die Teilchen bewegen, werden durch örtliche Temperatur- oder Dichteunterschiede beeinflusst.
- Wärmestrahlung: Abhängig von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit emittiert jeder Körper elektromagnetische Strahlung. Da diese sehr stark von der Temperatur abhängig ist, spricht man von Temperaturstrahlung. Die emittierte Wärmestromdichte q wird nach folgender Formel berechnet [FIS08]:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

q	Wärmestromdichte [W/m ²]
ε	Emissionsgrad [-]
σ	Stefan–Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
T	Temperatur [K]

2.2.4. Stationärer Wärmetransport

Von stationärem Wärmetransport spricht man, wenn im zeitlichen Verlauf über eine gleichbleibende Fläche immer die gleiche Wärmemenge transportiert wird [RIC08]. Dieser Zustand stellt sich bei über den Betrachtungszeitraum gleichbleibenden Temperaturverhältnissen ein. Unter natürlichen Verhältnissen liegt diese Bedingung aber normalerweise nicht vor. Bei der Annahme eines stationären Wärmetransportes werden Wärmespeicher- und Abkühlvorgänge nicht berücksichtigt. Diese instationären Anteile lassen sich für längere Betrachtungszeiträume unter Einhaltung ausreichender Genauigkeit vernachlässigen. Möchte man z.B. den Jahres-Heizwärmebedarf berechnen, kann man von stationären Verhältnissen ausgehen. Geht man weiter davon aus, dass die einzelnen Schichten eines Bauteils aus homogenen Materialien bestehen und vernachlässigt man Randanschlüsse, sowie örtliche Wärmebrücken, kann ein eindimensionaler Wärmestrom angenommen werden. Abbildung 2 zeigt, dass es bei dieser eindimensionalen Betrachtung eines Bauteils zu drei verschiedenen Vorgängen kommt. Der mit „I“ gekennzeichnete Bereich zeigt den Wärmeübergang von der Raumluft zur raumseitigen Bauteiloberfläche. Bereich „II“ stellt den

Wärmedurchgang durch das Bauteil selbst dar und der Bereich „III“ beschreibt den Wärmeübergang von der außenseitigen Bauteiloberfläche an die Außenluft [FIS08].

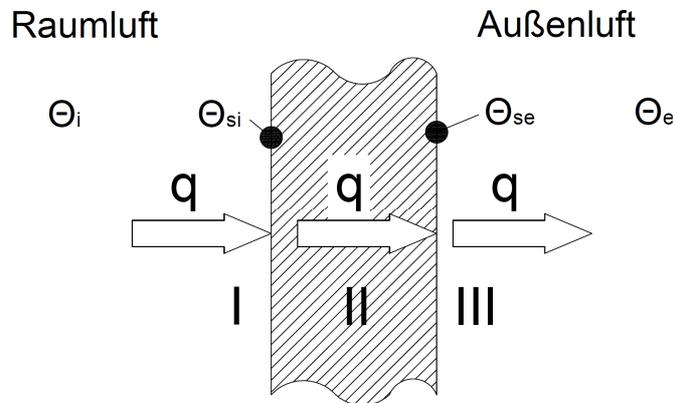


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Wärmedurchganges durch ein Bauteil [FIS08]

2.2.5. Instationärer Wärmetransport

Da es vor allem im sommerlichen Betrieb eines Gebäudes täglich zu starken Temperaturschwankungen kommt und die Temperaturspitzen an warmen Sommertagen zu einem Unbehaglichkeitsempfinden der Menschen führen, findet man hier mit der alleinigen Betrachtung der stationären Verhältnisse kein Auslangen mehr. Die oben erwähnten Wärmespeicher- und Abkühlvorgänge spielen nun eine wichtige Rolle und müssen zur Berechnung des Tagesganges der Raumtemperaturen innerhalb eines Gebäudes unbedingt beachtet werden [FIS08].

2.2.6. Wärmeleitfähigkeit

Wie oben erwähnt ist die Wärmeleitfähigkeit λ eine für die Bauphysik wichtige Kenngröße. Die Wärmeleitfähigkeit wird definiert als der Wärmestrom, der bei einem Temperaturgradienten von 1 K/m durch eine 1 m² große Schicht eines Stoffes hindurchgeht. Die Einheit für die Wärmeleitfähigkeit ist W/mK [LIE08].

Für den Bereich der Wärmedämmung ist eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit von Vorteil. Andersherum kann ein Stoff mit hoher Wärmeleitfähigkeit nicht sinnvoll als Dämmmaterial verwendet werden. Da Luft sehr gute Dämmeigenschaften hat, verbessert ein hoher Luftporengehalt die Wärmedämmeigenschaft eines Stoffes. Es ist von Vorteil, wenn ein Stoff viele kleine Poren anstatt weniger großer Poren aufweist.

Außerdem sollten die Poren homogen im Material verteilt sein. Da Wasser im Vergleich zu Luft ein ausgesprochen guter Wärmeleiter ist, verschlechtert eine Durchfeuchtung der Dämmebene eines Bauteils dessen Dämmeigenschaften enorm [BLA02].

Die ÖNORM EN ISO 10456 [ONO10b] definiert die Bemessungswärmeleitfähigkeit, als die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes unter bautypischen Randbedingungen. Für bauphysikalische Anwendungen (z.B.: thermische Simulationen) empfiehlt es sich jedoch die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts und der Temperatur des Baustoffes anzunehmen.

Der Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte q , der Temperaturdifferenz, sowie der Wärmeleitfähigkeit λ und der Dicke eines Bauteils lässt sich aus folgender Formel erkennen [RIC08]:

$$q = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (2.4)$$

q	Wärmestromdichte [W/m ²]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
T_2	Temperatur [K]
T_1	Temperatur [K]
d	Schichtdicke [m]

2.2.7. Wärmedurchlasswiderstand

Bezieht man die Wärmeleitfähigkeit nun auf eine Schichtdicke d und bildet man den Kehrwert daraus, erhält man den Widerstand, den eine einzelne Schicht dem Wärmestrom entgegensetzt. Er wird als Wärmedurchlasswiderstand R bezeichnet und hat die Einheit m²K/W.

Die Wärmedämmeigenschaften einer Bauteilschicht sind umso besser, je größer der Wert für den Wärmedurchlasswiderstand R ist. Besteht ein Bauteil aus mehreren Schichten, können die einzelnen Wärmedurchlasswiderstände addiert werden [BLA02].

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (2.5)$$

R	Wärmedurchlasswiderstand [m ² K/W]
λ_n	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
d_n	Schichtdicke [m]

2.2.8. Wärmeübergangskoeffizient

„Der Wärmeübergangskoeffizient h drückt die Wärmemenge (in Ws) aus, die pro Sekunde (s) zwischen 1 m^2 der Oberfläche eines festen Stoffes und der ihn berührenden Luft ausgetauscht wird, wenn der Temperaturunterschied zwischen Luft und Stoffoberfläche 1 K beträgt.“ [BLA02]

Im Bereich von Bauteiloberflächen setzt sich der Wärmetransport aus einem Anteil der Wärmestrahlung h_r und aus einem Anteil der Konvektion h_{cv} zusammen. Gemeinsam ergeben sie den Wärmeübergangskoeffizienten h [BLA02].

Der Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten zufolge Strahlung h_r kann anhand folgender Formel ermittelt werden [LUT02]:

$$h_r = \varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (2.6)$$

ε	Emissionsgrad der Oberfläche [-]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ [W/m}^2\text{K}^4]$
T_m	mittlere thermodynamische Temperatur [K]

2.2.9. Wärmeübergangswiderstand

Wie auch bei der Wärmeleitung und dem Wärmeübergang innerhalb eines Bauteils lässt sich für die Bauteiloberflächen aus dem Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten der Wärmeübergangswiderstand R_s bilden [BLA02].

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} \quad \text{bzw.} \quad R_{se} = \frac{1}{h_e} \quad (2.7)$$

R_{si}	innerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K/W}$]
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K/W}$]
h_i	innerer Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
h_e	äußerer Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$]

2.2.10. Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist sicherlich die gebräuchlichste und wichtigste Kennzahl im bauphysikalischen Wärmeschutz. Umso kleiner der U-Wert eines Bauteils ist, umso besser sind seine Wärmedämmeigenschaften [BLA02].

Die allgemeine Definition des Wärmedurchgangskoeffizienten lautet [RIC08]:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \cdot t \quad \text{bzw.} \quad U = \frac{Q}{A \cdot (T_i - T_e) \cdot t} \quad (2.8)$$

Q	Wärmemenge [Wh]
U	U-Wert [W/m ² K]
A	betrachtete Fläche [m ²]
T _i	operative Raumtemperatur [K]
T _e	Außenlufttemperatur [K]
t	Dauer des betrachteten Zeitraums [h]

Für stationäre Verhältnisse kann der Wärmedurchgangskoeffizient durch die unten angeführte Beziehung ausgedrückt werden. Diese fasst zwar den Wärmeenergietransport von einer Luftschicht durch das Bauteil bis zur anderen Luftschicht zusammen, die Strahlungseinflüsse bleiben jedoch im Wesentlichen unberücksichtigt.

$$U = \frac{1}{R_{se} + R + R_{se}} \quad (2.9)$$

U	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) [W/m ² K]
R _{si}	innerer Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]
R	Wärmedurchlasswiderstand [m ² K/W]
R _{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]

2.2.11. Wärmetransportprozesse innerhalb einer thermischen Zone

2.2.11.1. Wärmetransport durch opake Bauteile

In dieser Arbeit wird vorrangig der Wärmetransport durch opake Bauteile behandelt. In den bisherigen Betrachtungen wurde weder die solare Einstrahlung auf ein Bauteil, noch dessen langwelliger Strahlungsaustausch mit dem Himmel berücksichtigt. Um den effektiven Wärmemengentransport durch ein Bauteil ermitteln zu können, wird im numerischen Teil dieser Arbeit folgende Beziehung verwendet [RIC08]:

$$Q = Q_{\text{trans}} - Q_{\text{s,opak}} + Q_{\text{infra}} \quad (2.10)$$

Q	durch ein Bauteil transportierte Wärmemenge [Wh]
Q_{trans}	Wärmemengentransport durch Transmission [Wh]
$Q_{\text{s,opak}}$	Wärmemengeneintrag durch solare Strahlung [Wh]
Q_{infra}	Wärmemengenverlust durch langwellige Abstrahlung [Wh]

Der Wärmemengentransport durch Transmission Q_{trans} fasst die Vorgänge der Wärmeleitung und Konvektion anhand folgender Formel zusammen:

$$Q_{\text{trans}} = U \cdot (T_i - T_e) \cdot t \quad (2.11)$$

U_{stat}	stationärer U-Wert des jeweiligen Wandaufbaus [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
T_i	operative Raumtemperatur [K]
T_e	Außenlufttemperatur [K]
t	Dauer des betrachteten Zeitraums [h]

Der Eintrag an Wärmemenge durch Sonnenstrahlung $Q_{\text{s,opak}}$ über den betrachteten Zeitraum kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$Q_{\text{s,opak}} = I_s \cdot F_s \cdot \alpha_{\text{sol}} \cdot R_{\text{se}} \cdot U_{\text{stat}} \quad (2.12)$$

I_s	solare Einstrahlung [Wh]
F_s	Verschattungsfaktor [-]
α_{sol}	Absorptionsgrad [-]
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

U U-Wert des jeweiligen Wandaufbaus [W/m²K]

Der Infrarotstrahlungsaustausch zwischen Himmel und Oberfläche eines Bauteils Q_{infra} wird durch folgende Formel beschrieben:

$$Q_{\text{infra}} = F_{\text{sky}} \cdot h_r \cdot (T_e - T_{\text{sky}}) \cdot R_{\text{se}} \cdot U \cdot t \quad (2.13)$$

F_{sky}	sichtbarer Anteil des Himmels [-]
h_r	Übergangskoeffizient [W/m ² K]
T_{sky}	mittlere Himmelstemperatur [K]
T_e	Außenlufttemperatur [K]
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]

In der Literatur wird die Himmelstemperatur T_{sky} häufig um 10 K kälter als die Umgebungstemperatur angenommen. Die Differenz zwischen Himmelstemperatur und Umgebungstemperatur lässt sich aber auch aus dem Verhältnis des langwelligen Strahlungsanteils zum Strahlungsübergangskoeffizienten h_r berechnen.

Neben dem Wärmetransport durch opake Bauteile kommt es auch zu einem Wärmetransport durch transparente Flächen und zu einem Wärmeeintrag durch anwesende Personen und Geräte. Auch das Lüftungsverhalten führt zu gewollten oder ungewollten Wärmetransportvorgängen.

2.2.11.2. Wärmeeintrag durch Personen und Geräte

Personen, welche sich in einem Gebäude befinden, geben je nach Aktivität Wärme an ihre Umgebung ab. Ebenso verhält es sich mit elektrischen Geräten und Beleuchtung. Diese geben einen Großteil der ihnen zugeführten elektrischen Energie als Wärme ab [RIC08].

Im Sinne des sommerlichen Wärmeschutzes ist daher bei der Planung auf ausreichende, natürliche Belichtung zu achten, sodass der Beleuchtungsenergiebedarf unter Tags auf ein Minimum reduziert werden kann.

2.2.11.3. Wärmeeintrag über transparente Flächen

Der Wärmetransport durch eine Verglasung wird neben der Wärmeleitung und der Gasströmung im Scheibenzwischenraum wesentlich vom Strahlungstransport beeinflusst. Der solare Wärmeeintrag hängt von verschiedenen Faktoren ab [RIC08]:

- Jahres- und Tageszeit
- Standort des Gebäudes
- Seehöhe des Gebäudes
- Wettersituation
- Horizont
- Nachbarbebauung
- auskragende Bauteile
- Fensterrücksprünge

Im Sommer wird man versuchen die Fenster zu verschatten, um die solare Einstrahlung zu reduzieren.

2.2.11.4. Wärmetransport durch Luftwechsel

Durch den Luftwechsel werden sowohl Stofflasten abgebaut, als auch Wärmelasten abgeführt. Um die Stofflasten abzubauen, d.h. die verbrauchte Luft gegen frische Luft einzutauschen, ist ein vergleichsweise kleiner Förderstrom ausreichend. Um jedoch den im Sommer vorhandenen Wärmeüberschuss abzubauen, ist in der Regel eine weitaus intensivere Lüftung nötig. In einem Großteil der Fälle ist eine natürliche Belüftung (Fensterluftwechsel) ausreichend. Das bedeutet, dass keine mechanische Lüftungs- oder Klimaanlage benötigt wird. Ist eine solche Anlage erforderlich, ist das immer mit dem Verbrauch von Energie in Verbindung zu setzen [FIS08].

Neben den beiden genannten Luftwechselarten kommt es außerdem zu einem meist ungewünschten Luftaustausch. Der Infiltrationsluftwechsel wird durch die Dichtheit der Gebäudehülle bestimmt [RIC08].

2.3. Normative Grundlagen zum Somerverhalten von Gebäuden

Während man im Winter Energie aufwenden muss um die Temperatur innerhalb eines Gebäudes auf einem behaglichen Niveau halten zu können, muss im Sommer die Überwärmung der Räume begrenzt werden.

Mit der ÖNORM EN 15251 [ONO07] und der ÖNORM B 8110-3 [ONO99] werden in Österreich zwei Nachweisverfahren zur Prognostizierung einer möglichen sommerlichen Überwärmung bereitgestellt. Wird die Gefahr von überhöhten Raumtemperaturen in einer frühen Planungsphase erkannt, gibt es verschiedene Möglichkeiten der Überwärmung entgegenzuwirken. Anders als in Bürogebäuden wo die Installation einer Kühlanlage aufgrund des hohen Wärmeeintrags durch Personen und Geräte meist unumgänglich ist, kann in Wohngebäuden normalerweise darauf verzichtet werden. Die Wahrscheinlichkeit einer sommerlichen Überwärmung von Gebäuden kann durch verschiedene bautechnische Maßnahmen beeinflusst werden [LOH01]:

- Energiedurchlässigkeit der Verglasung sowie Vorhandensein von Sonnenschutzvorrichtungen
- Das Verhältnis von Fensterflächen zur gesamten Fläche der Außenbauteile
- Orientierung der Fensterflächen in Bezug auf die Himmelsrichtungen
- Wärmeleitfähigkeit der Außenbauteile
- Oberflächenfarbe der Außenbauteile
- Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile
- Qualität der Lüftungsmaßnahmen

2.3.1. ÖNORM EN 15251

Die ÖNORM EN 15251 [ONO07] legt Parameter für das Innenraumklima fest und gibt an, wie diese bei der Auslegung von Gebäuden verwendet werden sollen.

Die Norm wird für Gebäude angewandt, bei denen das Innenraumklima durch menschliche Nutzung bestimmt wird (z.B. Einfamilienhäuser, Wohnhäuser, Bürogebäude usw.).

Die ÖNORM EN 15251 [ONO07] teilt die Innenraumklimaqualität von Gebäuden in vier Kategorien ein. Die Einteilung beruht auf dem sogenannten PPD-Index, welcher die Unzufriedenheit der Nutzer eines Gebäudes widerspiegelt. Während die Qualität des

Innenraumklimas eines Gebäudes in der Kategorie I für sehr empfindliche Personen mit besonderen Bedürfnissen geeignet ist, soll eine Innenraumklimaqualität der Kategorie IV nur für einen begrenzten Teil des Jahres vorliegen. Es ist dann entweder zu kalt oder zu warm, um die Zufriedenheit der Benutzer aufrechterhalten zu können. Ein ausgeglichenes Maß an Innenraumklimaqualität bietet Kategorie II. Für die genannten Kategorien gibt die Norm zulässige operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode für Gebäude ohne Kühlanlagen an.

Die operative Raumtemperatur wird in der ÖMORM EN ISO 13791 [ONO05a] definiert. Sie ist die einheitliche Temperatur eines Raumes, mit der ein Benutzer die gleiche Menge an Wärmestrahlung und Konvektion austauschen würde wie mit dem nicht einheitlichen Raum.

Laut ÖNORM EN 15251 [ONO07] kann die operative Raumtemperatur für Langzeitmessungen abgeschätzt werden in dem die Raumlufttemperatur verwendet wird.

Im Gegensatz zur ÖNORM B 8110-3 [ONO99] legt die ÖNORM EN ISO 15251 [ONO07] keinen festen Temperaturgrenzwert fest, sondern definiert die Grenzwerte in Abhängigkeit zu den herrschenden Außentemperaturen. Dadurch ist sie für unterschiedliche klimatische Außentemperaturen anwendbar.

In dem aus der ÖNORM EN 15251 [ONO07] entnommenen Diagramm (Abbildung 3) sind den Kategorien I – III jeweils maximale und minimale zulässige Raumtemperaturen Θ_0 zugeordnet. Je nach Höhe der Außentemperatur Θ_{rm} (gleitender Mittelwert) lässt sich aus dem Diagramm die zulässige maximale bzw. minimale Innenraumtemperatur ablesen. Die Grenzwerte der Innenraumtemperaturen aus Abbildung 3 werden durch folgende Gleichungen definiert:

- Kategorie I

$$\text{oberer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \max} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 + 2 \quad (2.14)$$

$$\text{unterer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \min} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 - 2 \quad (2.15)$$

- Kategorie II

$$\text{oberer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \max} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (2.16)$$

$$\text{unterer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \min} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 - 3 \quad (2.17)$$

- Kategorie III

$$\text{oberer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \max} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 + 4 \quad (2.18)$$

$$\text{unterer Grenzwert:} \quad \Theta_{i \min} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 - 4 \quad (2.19)$$

Der gleitende Mittelwert der Außentemperatur Θ_{rm} errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{rm-1} \quad (2.20)$$

Θ_{rm}	gleitender Mittelwert der Temperatur für den aktuellen Tag
Θ_{rm-1}	gleitender Mittelwert der Temperatur für den vorherigen Tag
Θ_{ed-1}	Tagesmittelwert der Außentemperatur für den vorherigen Tag
α	Konstante zwischen 0 und 1 (empfohlen: 0,8)

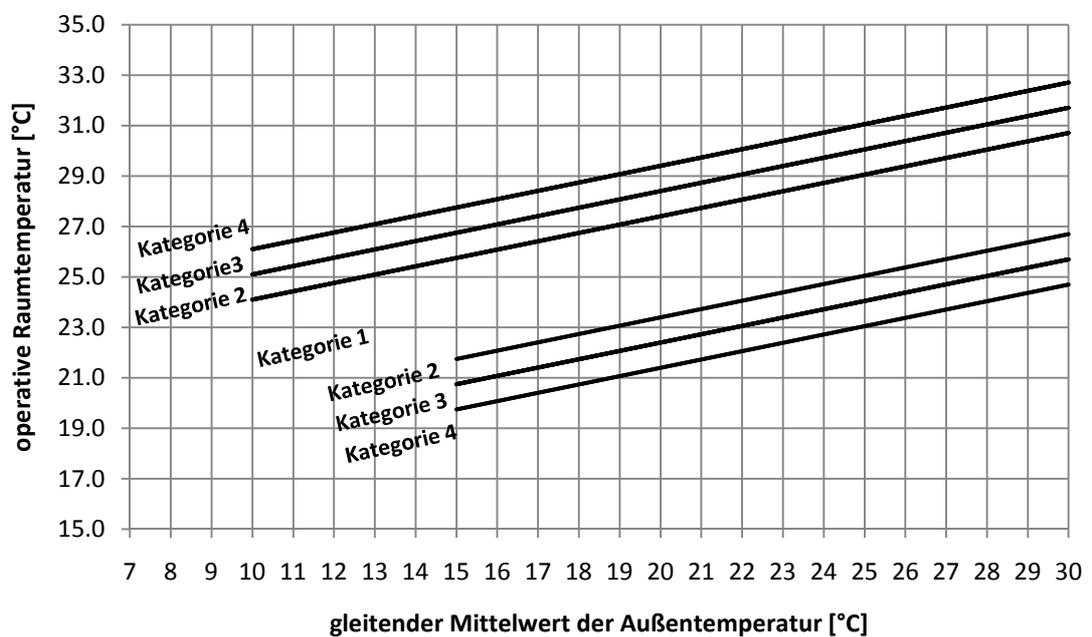


Abbildung 3: Zulässige Innentemperaturen von Gebäuden ohne Kühlanlagen in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur [ONO07]

Im Fall einer sommerlichen Überwärmung eines Gebäudes sind vor allem die kategorischen Abgrenzungen nach oben hin von Interesse. Eine Unterschreitung der Grenztemperaturen ist nicht zu erwarten.

Liegen beispielsweise der gleitende Mittelwert der Außentemperatur bei 19 °C und die Innenraumtemperatur Θ_0 bei 27 °C, befindet sich das Gebäude im Grenzzustand zwischen der optimalen Kategorie I und der Kategorie II.

Um den Nachweis der Unterschreitung der maximal zulässigen Raumtemperaturen Θ_0 laut ÖNORM EN 15251 [ONO07] erbringen zu können, ist eine Voraussage der Raumtemperaturen notwendig. Die Rahmenbedingungen für die Berechnung der

inneren Raumtemperaturen werden in der ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] festgehalten.

2.3.2. ÖNORM B 8110-3

Die ÖNORM B 8110-3 [ONO99] trägt den Titel „Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse“ und ist in Österreich das maßgebende Normenwerk im Zusammenhang mit der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden. Der Anwendungsbereich der ÖNORM B 8110-3 [ONO99] beschränkt sich auf Gebäude oder Räume, die dem dauernden oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen.

2.3.2.1. Normative Grenztemperaturen t^*

Die ÖNORM B 8110-3 [ONO99] betrachtet die sommerliche Überwärmung eines Raumes als vermieden, wenn die empfundene Raumtemperatur die Grenzwerte von +27 °C unter Tags und +25 °C in der Nacht nicht überschreitet. Um nachzuweisen, dass diese Grenztemperaturen t^* nicht überschritten werden, stellt die Norm zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Nachweis über den Tagesverlauf der Raumtemperatur
- Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse

2.3.2.2. Nachweis über den Tagesverlauf der Raumtemperatur

Der Nachweis der Unterschreitung der geforderten maximalen Temperaturen kann laut ÖNORM B 8110-3 [ONO99] über die Berechnung des Tagesganges der Raumtemperaturen mit Hilfe eines Rechenprogrammes erfolgen, solange das verwendete Programm den Anforderungen der ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] entspricht. Es wird keine spezifische numerische Verfahrensweise vorgeschrieben. Die Bedingung die zur Erfüllung des Nachweises eingehalten werden muss lautet:

$$t_{BER} \leq t^* \quad (2.21)$$

t_{BER}	berechnete Raumtemperatur
t^*	Grenztemperatur

Die für die Berechnung zu verwendende Außenlufttemperatur ist jene, die am jeweiligen Standort (im langjährigen Mittel) nicht öfter als 13 Tage pro Jahr überschritten wird. Stehen für den entsprechenden Standort des Gebäudes keine geeigneten Daten zur Verfügung, darf von einer mittleren Tagestemperatur von 23 °C ausgegangen werden. Außerdem sieht die Norm eine Tagesamplitude der Außenlufttemperatur von ± 7 K vor.

In der ÖNORM B 8110-3 [ONO99] ist die Nutzungsdauer eines Raumes nach der jeweiligen Nutzungsart genau festgelegt. Für die Berechnung der Raumtemperatur spielen die Nutzungsart und die Nutzungsdauer eines Raumes eine gewichtige Rolle, da sie das Lüftungsverhalten bzw. den Wärmeeintrag durch Personen und Geräte bestimmen.

2.3.2.3. Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse

Anmerkung:

Da der vereinfachte Nachweis nach ÖNORM B 8110-3 [ONO99] das an einem Gebäudestandort vorliegende Außenklima nicht berücksichtigt, ist er nicht für Standorte außerhalb Österreichs anwendbar. Aus diesem Grund wird der Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse im experimentellen bzw. numerischen Teil dieser Arbeit nicht näher untersucht. Der Vollständigkeit halber wird in diesem Kapitel jedoch die grundsätzliche Methodik des vereinfachten Nachweises erläutert.

Wie oben beschrieben kann der Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung durch die Berechnung des Tagesganges der Raumtemperaturen erbracht werden. Die Norm geht jedoch auch davon aus, dass die Grenztemperatur t^* unterschritten wird, wenn die immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,l}$ größer ist als in Tabelle 1 angegeben. Die erforderliche immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse ist dabei von dem immisionsflächenbezogenen stündlichen Luftvolumenstrom abhängig und muss für den kritischsten Einzelraum eines Gebäudes berechnet werden.

Tabelle 1: Erforderliche immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,I}$ in Abhängigkeit vom immisionsflächenbezogenen stündlichen Luftvolumenstrom $V_{L,s}$

Immisionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom $V_{L,s}$ in $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$	Immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,I}$ in kg/m^2
≥ 100	≥ 2000
75	≥ 4000
50	≥ 8000
immisionsbezogene Luftvolumenströme von weniger als $50 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ sind grundsätzlich zu vermeiden	

Immisionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom $V_{L,s}$

Der immisionsflächenbezogene stündliche Luftvolumenstrom $V_{L,s}$ wird nach folgender Formel errechnet:

$$V_{L,s} = \frac{n_L \cdot V}{\sum A_I} \quad (2.22)$$

$V_{L,s}$	immisionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom
	$[\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}]$
n_L	Luftwechselzahl $[1/\text{h}]$
V	Volumen des Raumes $[\text{m}^3]$
A_I	Immisionsfläche $[\text{m}^2]$

Die Immisionsfläche A_I wird nach nachstehender Formel berechnet:

$$A_I = A_{AL} \cdot f_g \cdot g \cdot Z_{on} \cdot z + A_S + A_T \quad (2.23)$$

A_I	Immisionsfläche $[\text{m}^2]$
A_{AL}	gesamte Architekturlichte der verbauten Fenster $[\text{m}^2]$
f_g	Glasflächenanteil $[-]$
g	Gesamtenergie-Durchlassgrad $[-]$
Z_{on}	Orientierungs- und Neigungsfaktor $[-]$
z	Abminderungsfaktor für Abschattungseinrichtungen $[-]$

A_S	äquivalente Immisionsfläche für Personenwärme [m^2] (in Wohnräumen ist A_S null zu setzen)
A_T	äquivalente Immisionsfläche für technische Wärmequellen [m^2]

Je nach Orientierung und Neigung eines Gebäudes bzw. je nach dem ob Abschattungseinrichtungen vorhanden sind oder nicht gibt die ÖNORM B 8110-3 [ONO99] Werte für die erforderlichen Faktoren an.

Immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,I}$

Die speicherwirksame Masse eines Raumes setzt sich aus der Summe der speicherwirksamen Massen aller raumabschließenden Bauteile und der speicherwirksamen Masse der Einrichtungsgegenstände zusammen. Im Anhang der ÖNORM B 8110-3 [ONO99] sind Tabellen und Diagramme zur Ermittlung der speicherwirksamen Masse von Bauteilen gegeben.

Für den vereinfachten Nachweis laut Norm muss die speicherwirksame Masse auf die Immisionsfläche A_I bezogen werden.

$$m_{w,I} = \frac{\sum m_{w,B} + m_{w,E}}{\sum A_I} \quad (2.24)$$

$m_{w,I}$	gesamte speicherwirksame Masse [kg]
$m_{w,B}$	speicherwirksame Masse eines Bauteils [kg]
$m_{w,E}$	gesamte speicherwirksame Masse der Einrichtung [kg]
A_I	Immisionsfläche [m^2]

Mit der so ermittelten immisionsflächenbezogenen speicherwirksamen Masse $m_{w,I}$ kann nun an Hand von Tabelle 1 der Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung erbracht werden.

2.3.3. ÖNORM EN ISO 13791

Um den Nachweis über den Tagesverlauf der Raumtemperaturen nach ÖNORM B 8110-3 [ONO99] führen zu können, müssen die Raumtemperaturen korrekt prognostiziert werden. Die grundlegenden Methoden für die Berechnung der

Raumtemperaturen sind in der ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] und ÖNORM EN ISO 13792 [ONO05b] festgehalten.

Die ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] stellt die Grundlage zur Entwicklung von Berechnungsverfahren innerer Temperaturen von Räumen dar. Die Raumlufttemperaturen werden in der Norm nach folgender Gleichung definiert:

$$\sum_{j=1}^N (A \cdot q_{c,i})_j + \Phi_v + \Phi_{i,c} + \Phi_{sa} + \Phi_{va} = c_a \cdot m_{a,i} \cdot \frac{\partial \theta_{a,i}}{\partial t} \quad (2.25)$$

N	Anzahl der Innenoberflächen [-]
A	Fläche jedes Elements der Umschließungsfläche [m ²]
q _{c,i}	mit jedem Element der Umschließungsfläche ausgetauschte Wärmestromdichte [W/m ²]
Φ _v	Wärmestrom durch Lüftung [W]
Φ _{i,c}	Wärmestrom zufolge innerer Wärmequellen [W]
Φ _{sa}	Wärmestrom durch Absorption in der Luft [W]
Φ _{va}	von Raumluft durch Luftschichten in den von Elementen begrenzten Raum eintretende Wärmestrom [W]
c _a	spezifische Wärmekapazität der Raumluft [J/kgK]
m _{a,i}	Masse der Raumluft [kg]
θ _{a,i}	Temperatur der Raumluft [°C]
t	Zeit [s]

Aufgrund der geringen Masse und spezifischen Speicherkapazität der Luft wird der rechte Teil der Gleichung Null.

Die inneren Oberflächentemperaturen ergeben sich aus folgender Beziehung:

$$q_{lr} + q_{sr,j} + q_{c,j} + q_{cd,j} + \Phi_{i,r} / \left(\sum_{j=1}^N A_j \right) = 0 \quad (2.26)$$

q _{lr}	Wärmestromdichte zufolge langwelligem Strahlungsaustausch mit anderen Innenoberflächen [W/m ²]
q _{sr}	Wärmestromdichte zufolge kurzwelliger Strahlung [W/m ²]
q _c	Wärmestromdichte zufolge Konvektion [W/m ²]

q_{sr}	Wärmestromdichte zufolge Wärmeleitung [W/m ²]
Φ_{lr}	Wärmestrom aus inneren Wärmequellen mit langwelligem Strahlungsanteil [W/m ²]
N	Anzahl der Innenoberflächen [-]
A_j	Umschließungsfläche des Elements j [m ²]

Die Berechnung der Parameter folgt im Wesentlichen schon beschriebenen Zusammenhängen und wird daher nicht weiter erläutert.

Die Norm schreibt keine spezifischen Techniken für die Berechnung vor, sie beinhaltet jedoch ein Validierungsverfahren, anhand dessen die normgemäße Funktionsweise eines Berechnungsverfahrens überprüft werden kann. Im numerischen Teil dieser Arbeit wird mit dynamischen Simulationsprogrammen gearbeitet, welche auf den in der ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] beschriebenen Grundlagen basieren und den dort gestellten Anforderungen entsprechen.

2.3.4. ÖNORM EN ISO 13792

Da ein dynamisches Berechnungsverfahren nach ÖNORM EN ISO 13791 [ONO05a] für viele Anwendungsfälle zu detailliert ist, wird mit der ÖNORM EN ISO 13792 [ONO05b] ein vereinfachtes Berechnungsverfahren erlaubt.

Die Forderung nach einer Vereinfachung der Eingabedaten für die Berechnung der inneren Raumtemperaturen wird erfüllt, indem die Wärmeübertragungsprozesse in vereinfachter Form in die Berechnung eingehen. Auch die Menge und die Genauigkeit der Ausgabedaten sinkt infolge dieser Vereinfachung.

Der höchstzulässige Vereinfachungsgrad richtet sich dabei nach der geforderten Genauigkeit der Ausgabedaten.

3. Fragestellung für die experimentellen bzw. numerischen Untersuchungen

Welchen Einfluss haben Wärmedämmverbundsysteme auf das Sommerverhalten von Gebäuden bei gemäßigtem bis subtropischem Klima?

4. Auswahl der Forschungsmethode und Begründung

Um ein möglichst aufschlussreiches und präzises Ergebnis dieser Arbeit sicher zu stellen, wird ein messtechnischer Versuch durchgeführt. Anschließende dynamische Bauteil- und Gebäudesimulationen mittels geeigneter Computersoftware sind notwendig, um die Messergebnisse auf Plausibilität überprüfen und weitere Erkenntnisse gewinnen zu können. Durch die Interaktion der experimentellen Untersuchung und der Bauteilsimulation validieren sich die beiden Untersuchungsmethoden gegenseitig. In Abbildung 4 ist der Ablauf des experimentellen bzw. numerischen Teils dieser Arbeit dargestellt.

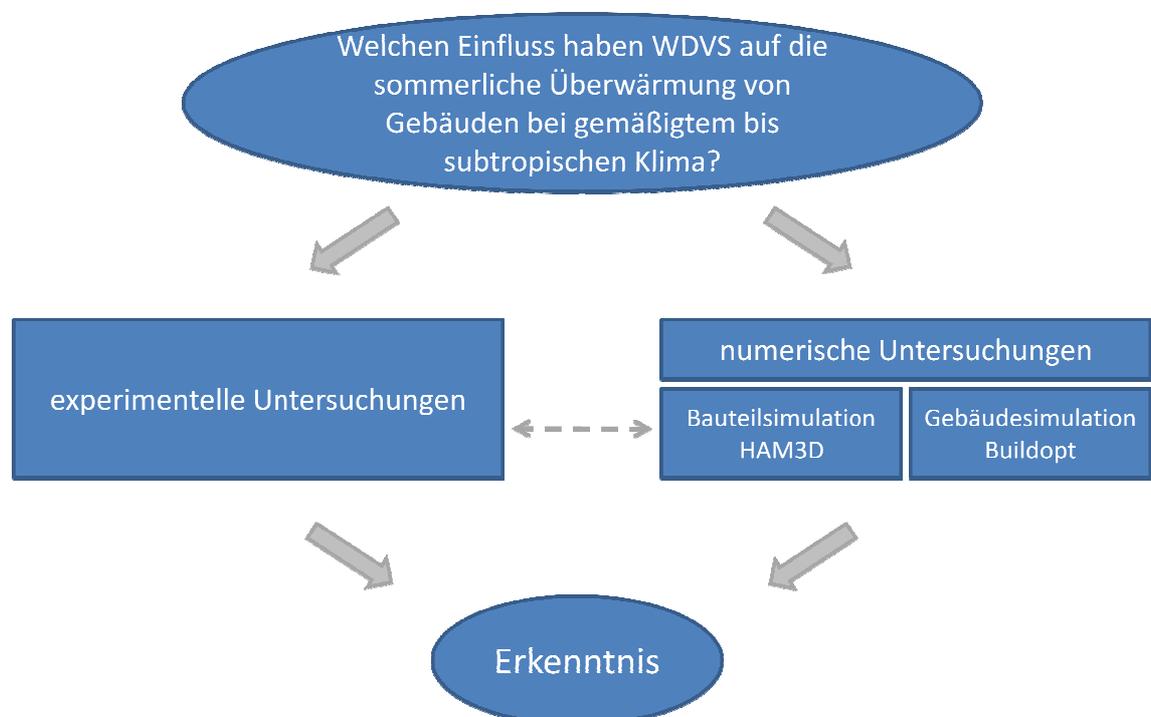


Abbildung 4: Vorgehensweise zur Beantwortung der zentralen Fragestellung der Diplomarbeit

5. Experimentelle Untersuchung

5.1. Aufbau des Experiments

Um die Wirksamkeit von WDVS zur Begrenzung der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden feststellen zu können, ist ein direkter Vergleich zwischen einem Außenwandaufbau mit WDVS und einem Außenwandaufbau ohne WDVS notwendig. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Teil des Universitätsgebäudes der TU Wien (Adolf-Blamauer-Gasse 1-3, 1030 Wien) zur Verfügung gestellt.

An einer Teilfläche der Fassade des Gebäudes wird ein WDVS hergestellt. Der übrige Teil des Gebäudes wird in seinem ursprünglichen Zustand belassen. Es entstehen somit zwei unterschiedliche Außenwandaufbauten.

Anschließend wird eine Messanlage am gedämmten Bereich und an Teilen des ungedämmten Bereichs installiert. Die über mehrere Wochen laufende Messung liefert aussagekräftige Daten zu Innen- und Außentemperaturen, sowie zu den Wärmetransportprozessen durch die Wandaufbauten.

5.1.1. Örtliche Gegebenheiten

Das Versuchsgebäude wird hauptsächlich als Büro bzw. auch als Labor und Werkstatt vom Institut für Hochbau und Technologie (Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz) der TU Wien genutzt.

Der Bereich des Gebäudes, in dem die Messungen stattfinden setzt sich aus drei Büroräumen zusammen. Da die Räume während der Messungen weiterhin normal genutzt werden, ist es nicht möglich ein gänzlich einheitliches Nutzungsbild für die drei Büroräume zu schaffen. Dieser Umstand wird bei der Analyse der Messergebnisse jedoch berücksichtigt.

Auf Grund der für Wiener Verhältnisse eher schwachen Bebauung in der Umgebung des Gebäudes werden die für den Versuch relevanten Fassadenflächen kaum beschattet. Lediglich eine Baumreihe verhindert am Nachmittag kurzfristig die direkte Sonnenbestrahlung der Versuchsflächen.

In den Abbildungen 5 und 6 sind Außenansichten des Gebäudes in der Adolf-Blamauer-Gasse 1-3 dargestellt. Die roten Markierungen in den Abbildungen kennzeichnen jenen Bereich an dem die Messanlage für den Versuch installiert wird.



Abbildung 5: fotografische Außenansicht des Gebäudes in der Adolf-Blamauer-Gasse 1-3

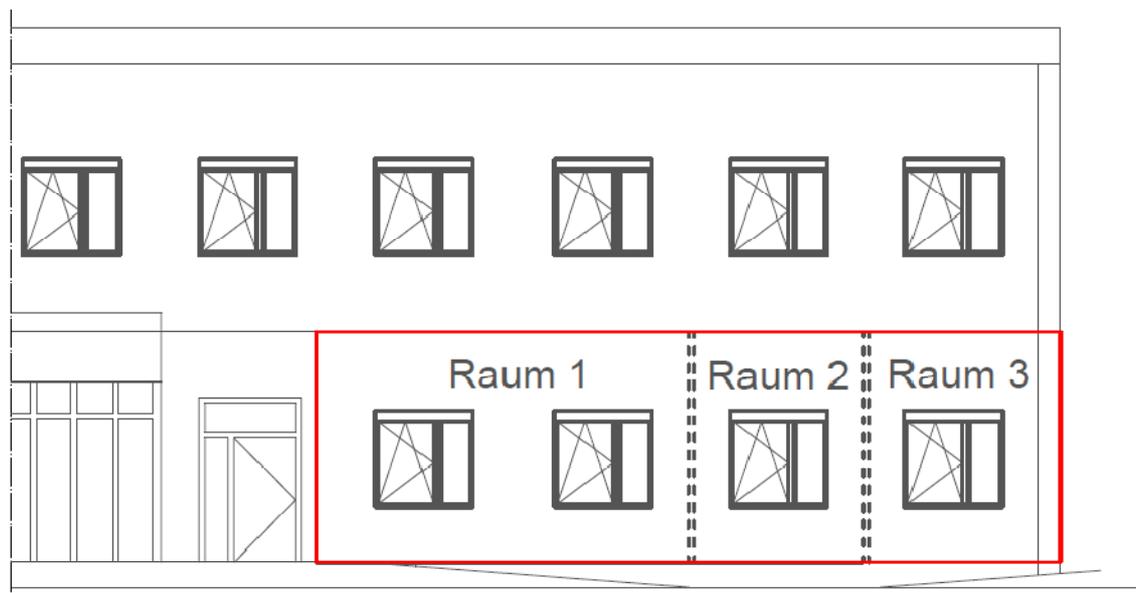


Abbildung 6: planerische Außenansicht des Gebäudes in der Adolf-Blamauer-Gasse 1-3

Für die Untersuchungen wird eine Messanlage in drei im Erdgeschoß liegenden Räumen aufgebaut. Abbildung 7 zeigt den Grundriss dieser drei Räume. Die in der Abbildung festgelegten Raumbezeichnungen „Raum 1“, „Raum 2“ und „Raum 3“ werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet. Die Räume haben folgende Nutzflächen:

- Raum 1: 16,9 m²
- Raum 2: 8,4 m²
- Raum 3: 8,6 m²

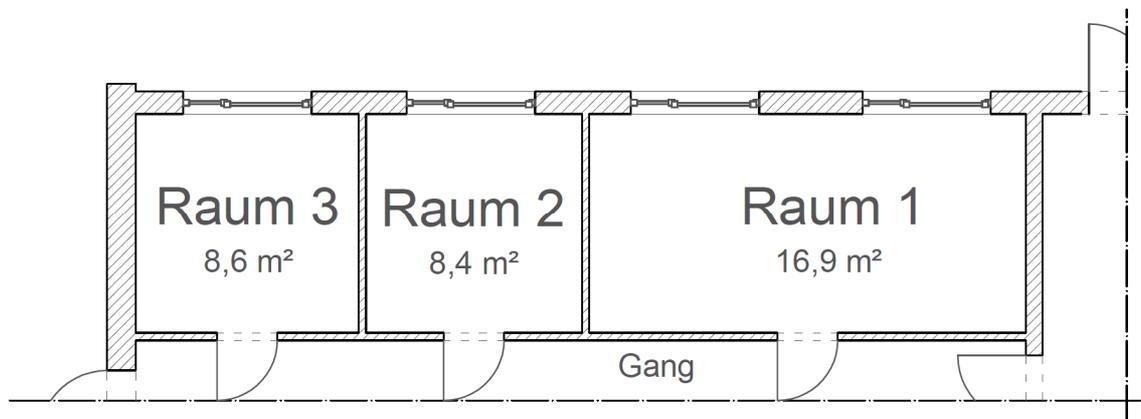


Abbildung 7: Grundriss des Gebäudeteils in dem sich die Versuchsräume befinden

Die Ausrichtung Fassade der Räume weicht von Süden etwas in Richtung Westen ab. „Raum 3“ wird zusätzlich von einer südöstlich gelegenen Außenwand begrenzt (siehe Abbildung 7).

Die Fenster in den Versuchsräumen haben eine einheitliche Architekturlichte von ca. 1,70 m x 1,48 m und eine Parapethöhe von ca. 0,90 m. Im gesamten Gebäude sind Fenster verbaut, deren Rahmen aus Aluminiumprofilen bestehen und eine zweifache Verglasung aufweisen.

5.1.2. Wandaufbau ohne WDVS

Die südwestlich ausgerichtete Außenwand des Gebäudes, an welcher die Messanlage installiert wird, besteht aus zwei verschiedenen Wandaufbauten. Anhand von Bohrungen kann folgendes festgestellt werden: Während der Regelwandaufbau aus einer Art Holzspanbeton besteht, liegt in den Bereichen über den Fenstern

(Fensterüberlager) ein Hochlochziegelmauerwerk vor. Die schematischen Aufbauten sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich. In den Abbildungen sind die Materialien der vorhandenen Schichten, sowie die zugehörigen Schichtdicken ausgewiesen.



Abbildung 8: Wandaufbau im Bereich der Fensterüberlager vor Herstellung des WDVS

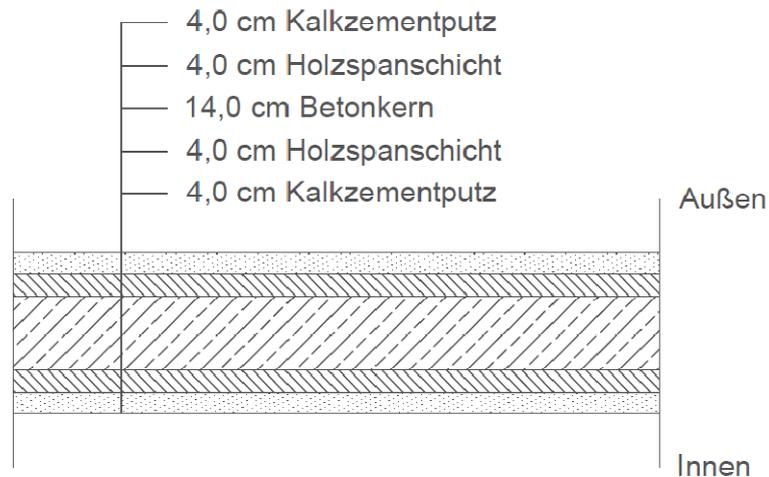


Abbildung 9: Regelwandaufbau vor Herstellung des WDVS

5.1.3. Wandaufbau mit WDVS

Da an Hand dieses Versuches festgestellt werden soll, wie sich das wärmetechnische Verhalten eines Bauteils (bzw. eines gesamten Gebäudes) bei sommerlichen Außentemperaturen durch das Herstellen eines WDVS verändert, ist es erforderlich zwei unterschiedliche Bereiche zu schaffen. Aus diesem Grund wird an der Fassade in den Bereichen der Räume 1 und 2 eine 20 cm starke Dämmebene angebracht. Im

Folgenden werden die verwendeten Materialien, sowie deren Verarbeitung beschrieben.

5.1.3.1. Materialien

Als Dämmmaterial wird für diesen Versuch EPS F-Plus von der Firma Austrotherm GmbH zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um einen Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum, welcher mit Graphit versetzt ist. Diesem verdankt das Material auch seine graue Färbung (siehe Abbildung 11). An der Oberfläche der Dämmplatten ist eine helle Schutzschicht appliziert (siehe Abbildung 12), welche die Platten vor zu starker Erwärmung während der Montage schützt.

Laut dem Produktdatenblatt [AUS10] liegt die Wärmeleitfähigkeit von Austrotherm EPS F-Plus bei 0,031 W/mK.

Die EPS Dämmplatten werden mit einem werksgemischtem, mineralischen Pulverkleber (Spachtelmasse) und Klebeankern an der bestehenden Fassade befestigt. Zuerst wird ein Raster mit maximal 40 cm Abstand für die Anker festgelegt. Anschließend werden die nötigen Löcher gebohrt und die Klebeanker gesetzt. Nach Erfordernis werden entweder Baunit Klebeanker 88 oder Baunit Klebeanker 55 (Schaftlänge 88 mm bzw. 55 mm) verwendet. Abbildung 10 zeigt die Anordnung der Anker. Es ist ersichtlich, dass im Sockelbereich normgemäß XPS Dämmplatten verwendet werden. Die verwendeten Klebeanker erfordern keine Durchdringung der Dämmschicht. Sie verbessern lediglich die Haftung zwischen Spachtelmasse und bestehender Fassade.

Auf die gesetzten Anker werden anschließend die EPS Dämmplatten unter Verwendung der „Rand-Wulst-Punkt Methode“ geklebt (siehe Abbildung 11). Die entstehende Schichtdicke der Klebmasse beträgt 2-3 cm.

Laut dem Produktdatenblatt [WOP10] liegt die Wärmeleitfähigkeit von Baunit Klebespachtelmasse bei 0,8 W/mK.



Abbildung 10: Anordnung der gesetzten Anker an der Fassade



Abbildung 11: „Rand-Wulst-Punkt Methode“ zum Kleben der Dämmung

Dieselbe Spachtelmasse wird auch als Unterputzmörtel verwendet. Wie in Abbildung 12 zu erkennen, wird in eine mit der Zahnpachtel aufgetragene Schicht ein Textilglasgitter eingebettet und „nass in nass“ mit Spachtelmasse überzogen.



Abbildung 12: Aufbringen des Unterputzmörtels auf das EPS

Um eine einheitliche, äußere Oberfläche für den gesamten Messbereich zu schaffen, wird im letzten Arbeitsschritt sowohl der Unterputz des neugeschaffenen Wärmedämmverbundsystems, als auch der für die Messungen ohne zusätzlicher Dämmebene zur Verfügung stehende Bereich, mit weißer Farbe verputzt.

Die in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellten Wandaufbauten werden durch das Herstellen des WDVS um vier Schichten erweitert. Abbildung 13 zeigt den entstandenen Wandaufbau im Bereich des Fensterüberlagers. Der Regelwandaufbau des neuen WDVS ist in Abbildung 14 dargestellt. In den Abbildungen sind die Materialien der vorhandenen Schichten, sowie die zugehörigen Schichtdicken angegeben.

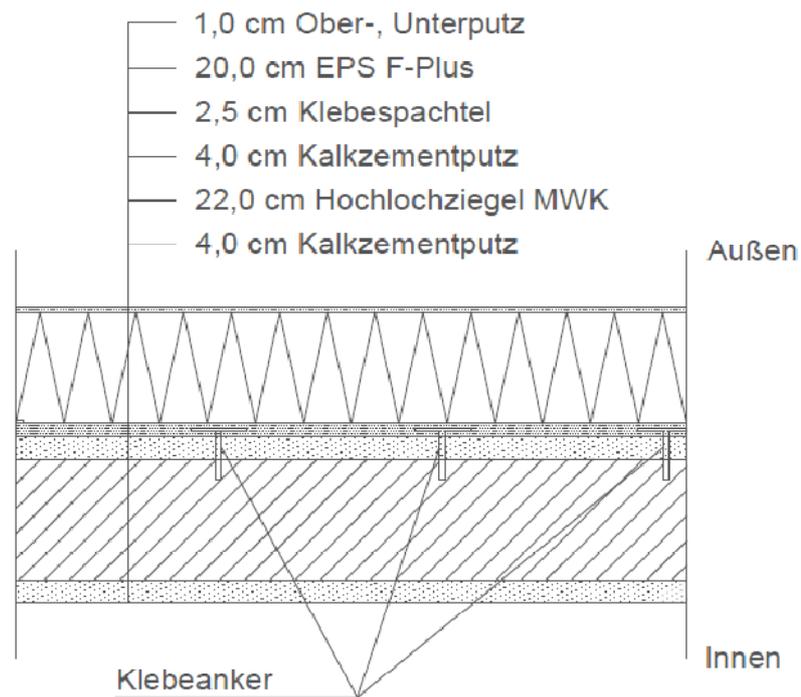


Abbildung 13: Wandaufbau im Bereich der Fensterüberlager nach Herstellung des WDVS

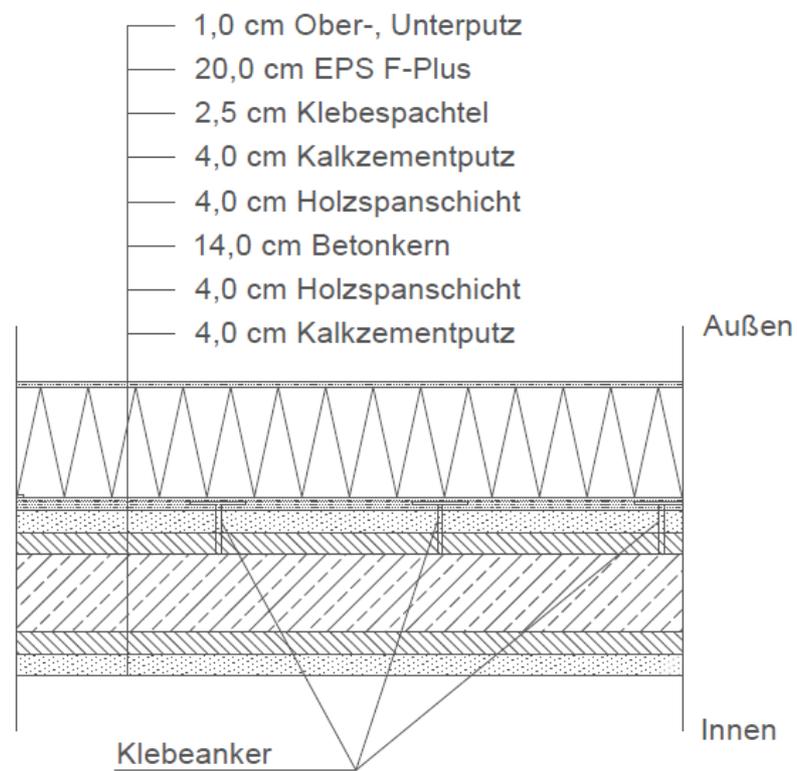


Abbildung 14: Regelwandaufbau der Außenwand nach Herstellung des WDVS

5.1.4. Installation der Messanlage

Um die wärmetechnischen Vorgänge in den beschriebenen Wandaufbauten der Versuchsräume nachvollziehen zu können und um die später durchgeführte Bauteilsimulation validieren zu können, wird eine Vielzahl von Messgeräten installiert. Sowohl an der Innenseite, als auch an der Außenseite werden Lufttemperaturen mittels Temperatursensoren gemessen. An der Innenseite werden zusätzlich die Oberflächentemperaturen festgestellt. Neben den Temperatursensoren werden zusätzlich Wärmestrommessplatten an der Innenseite der Wand und Strahlungsmessgeräte an der Außenseite der Wand installiert. In Tabelle 2 (Seite 34) sind die verwendeten Messgeräte aufgelistet.

Im Folgenden werden die einzelnen Messinstrumente und deren Funktion kurz beschrieben.

5.1.4.1. Temperatursensor PT100 / PT1000

Bei den verwendeten Temperatursensoren handelt es sich um Platin-Temperatursensoren in Dünnschichttechnik. Sie sind im Dauerbetrieb für einen Temperaturbereich von -70 °C bis $+500\text{ °C}$ geeignet.

5.1.4.2. Wärmestrommessplatte

Die verwendeten Wärmestrommessplatten (oder auch Wärmestrommessfolien) messen den Wärmestrom in W/m^2 durch einen Wandaufbau. Sie werden so installiert, dass positive Werte für Wärmetransport von außen nach innen und negative Werte für Wärmetransport von innen nach außen stehen. Somit führen positive Wärmeströme tendenziell zu einer Erwärmung der Innenräume.

5.1.4.3. Pyranometer CM 3

Das Pyranometermodell CM 3 misst die auftreffende kurzwellige Strahlungsmenge in W/m^2 . Für diesen Versuch werden zwei dieser Pyranometer an der südseitigen Fassade der Versuchsräume installiert.

5.1.4.4. Pyrradiometer

Das Pyrradiometer misst getrennt die einfallende Strahlung in W/m^2 und die reflektierte Strahlung in W/m^2 . Es lassen sich somit sowohl die Strahlungsbilanz, als auch die Strahlungskomponenten ermitteln. Das Gehäuse des Geräts beherbergt zwei Strahlungsmessflächen, sowie einen Temperaturmesssensor PT 100 und liefert somit drei getrennte Werte.

5.1.4.5. Anordnung der Messgeräte

Tabelle 2 ist eine nach Räumen aufgeteilte Auflistung aller installierten Messgeräte. In der Tabelle wird jedem einzelnen Sensor eine Kurzbezeichnung (z.B.: PT23) zugewiesen und seine Position festgelegt. Ist im weiteren Verlauf der Arbeit von einem speziellen Sensor die Rede, so wird die in Tabelle 2 definierte Kurzbezeichnung verwendet. Die genaue Position der in Tabelle 2 angeführten Messsensoren innerhalb der Räume ist Abbildung 16 zu entnehmen.

Tabelle 2 und die darauffolgende Abbildung 16 sind für das Verständnis der folgenden Kapitel essentiell.

Anmerkung:

Neben den in Tabelle 2 und Abbildung 16 angeführten Messsensoren werden noch einige andere Sensoren installiert. Da diese jedoch für die Auswertung des Experiments nicht benötigt werden, werden sie auch hier nicht angeführt.

Der Temperatursensor PT28 wird von seiner ursprünglichen Position (Außenseite des Wandaufbaus im Bereich im Bereich P1) am 11.8.2010 um 10:00 Uhr abgezogen und gleich darauf in einem Strahlungsschirm in der Nähe des Pyrradiometers wieder in Betrieb genommen.

Es ist davon auszugehen, dass die direkt nebeneinander liegenden Wärmestrommessfolien (Q3 und Q4, Q5 und Q6 bzw. Q7 und Q8) annähernd idente Messergebnisse liefern werden, da sie praktisch die gleichen Randbedingungen haben. Aus diesem Grund wird in den Bauteilsimulationen für jedes dieser Wärmestrommessfolienpaare nur eine Simulation durchgeführt. Es ergeben sich somit

fünf Simulationspositionen, welche mit P1, P2, P3/4, P5/6 und P7/8 bezeichnet werden.

Abbildung 15 zeigt die Fassade des Gebäudes nach Herstellung des WDVS und Installation der Messanlage. Zu diesem Zeitpunkt sind alle vorbereitenden Schritte abgeschlossen und der Messvorgang kann beginnen.



Abbildung 15: Außenansicht des Gebäudes nach der Installation der Messanlage

Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Messgeräte, Einteilung nach Räumen und Zuweisung von Kurzbezeichnungen und Positionen

Bezeichnung	Messgerät	[-]	Position
Raum 1			P1
Q1	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	Oberfläche über Fenster (innen)
PT01	PT1000	[°C]	Oberfläche über Fenster (innen)
PT02	PT1000	[°C]	Lufttemperatur über Fenster (innen)
PT05	PT1000	[°C]	op. Raumtemp. über Fenster (innen)
PT28	PT1000	[°C]	Lufttemperatur über Fenster (außen) ab 11.8.2010, 10:00 Uhr: Lufttemperatur im Strahlungsschirm (außen)
			P2
Q2	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	Oberfläche zwischen Fenstern (innen)
PT06	PT1000	[°C]	Oberfläche zwischen Fenstern (innen)
PT07	PT1000	[°C]	Lufttemp. zwischen Fenstern (innen)
PT10	PT1000	[°C]	op. Raumtemp. zwischen Fenstern (innen)
			P3/4
Q3	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	Oberfläche über Fenster (innen)
Q4	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	
PT11	PT1000	[°C]	Oberfläche über Fenster (innen)
PT12	PT1000	[°C]	Lufttemperatur über Fenster (innen)
PT15	PT1000	[°C]	op. Raumtemp. über Fenster (innen)
Raum 2			P5/6
Q5	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	Oberfläche über Fenster (innen)
Q6	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	
PT16	PT1000	[°C]	Oberfläche über Fenster (innen)
PT17	PT1000	[°C]	Lufttemperatur über Fenster (innen)
PT20	PT1000	[°C]	op. Raumtemp. über Fenster (innen)
Raum 3			P7/8
Q7	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	Oberfläche über Fenster (innen)
Q8	Wärmestrommessplatte	[W/m ²]	
PT21	PT1000	[°C]	Oberfläche über Fenster (innen)
PT25	PT1000	[°C]	op. Raumtemp. über Fenster (innen)
PT26	PT1000	[°C]	Lufttemperatur über Fenster (innen)
Pyranometer und Pyrradiometer (außen)			
S01	Pyranometer CM 3	[W/m ²]	Oberfläche (außen)
S02	Pyranometer CM 3	[W/m ²]	Oberfläche (außen)
S03	Pyrradiometer	[W/m ²]	Richtung Wand (außen)
S04	Pyrradiometer	[W/m ²]	Richtung Umgebung (außen)
PT22	PT100	[°C]	70 cm von Wand entfernt (außen)

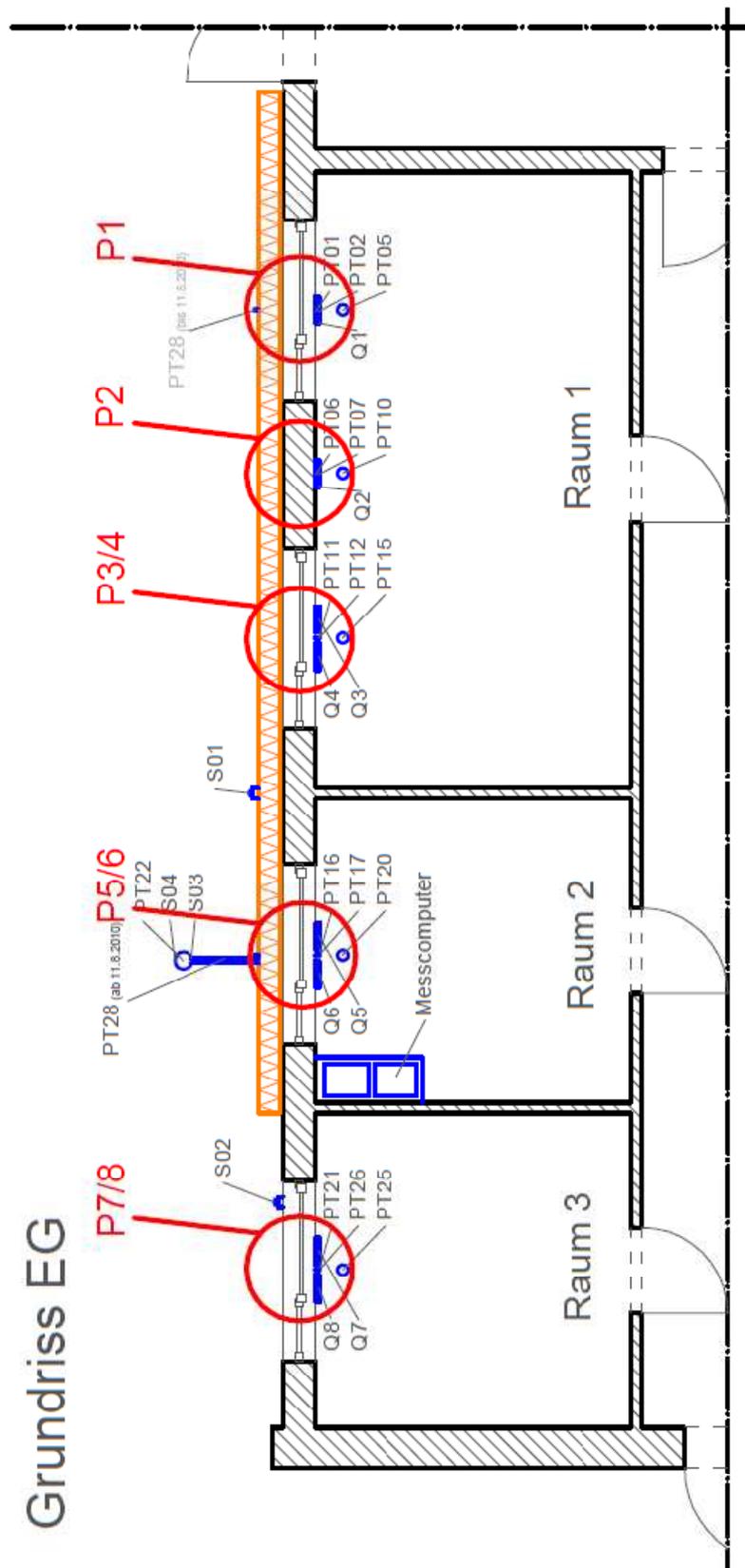


Abbildung 16: Positionierung der einzelnen Messsensoren im Grundriss

5.2. Versuchsablauf

Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Messanlage ist der 4.8.2010 um 12:43 Uhr. Von diesem Zeitpunkt an werden die Messdaten der einzelnen Sensoren im Minutentakt von einem vor Ort befindlichen Computer erfasst und gespeichert. Da sich diese Diplomarbeit mit dem Phänomen der sommerlichen Überwärmung beschäftigt, wird die Analyse der Daten auf den Zeitraum zwischen Start der Messanlage am 4.8.2010 (12:43 Uhr) und dem 22.9.2010 (15:17 Uhr) begrenzt. Insgesamt stehen somit die Messdaten von knapp 1174 Stunden zur Verfügung.

Da das Gebäude während des gesamten Versuchs genutzt wird, ist davon auszugehen, dass die Randbedingungen welche durch menschliche Nutzung verändert werden können weder gleichbleibend sind, noch für alle drei Versuchsräume als ident angesehen werden können. So ist es z.B. möglich, dass in einem Raum die Jalousien für gewisse Zeit abgeblendet sind, während sie in einem anderen Raum nicht heruntergelassen sind. Bei der Analyse der Messdaten wird dieser Umstand berücksichtigt.

5.3. Analyse der Messdaten

Die Analyse der Messdaten hat das Ziel eine Aussage über die Wirksamkeit von WDVS zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung von Gebäuden treffen zu können. Aus diesem Grund werden im Folgenden Vergleiche zwischen Messergebnissen aus dem im ursprünglichen Zustand belassenen Außenwandbereich (Position P7/8) und dem hergestellten WDVS (Positionen P1, P2, P3/4, P5/6) angestellt.

Der für den Benutzer eines Gebäudes wahrscheinlich wichtigste Faktor im Zusammenhang mit der Behaglichkeit während der Sommermonate ist die Innenraumtemperatur. Da die Randbedingungen für die verschiedenen Versuchsräume wie schon erwähnt nicht ident sind, ist die Betrachtung der Innentemperaturen zwar durchaus interessant, aber für eine exakte Beantwortung der Fragestellung nicht ausreichend. Eine viel genauere Aussage lässt sich durch den Vergleich der gemessenen Wärmeströme durch die verschiedenen Wandaufbauten erreichen.

Ein Blick auf den in Abbildung 17 dargestellten Außentemperaturverlauf zeigt, dass die Außenlufttemperaturen mit Anfang September stark abfallen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind somit die vier Wochen zwischen dem ersten vollständig gemessenen Tag (5.8.2010) und dem Ende der Hitzeperiode (2.9.2010) maßgebend.

Um die Übersichtlichkeit der Diagramme zu bewahren wird in den meisten Abbildungen auf die Darstellung der übrigen Tage verzichtet.

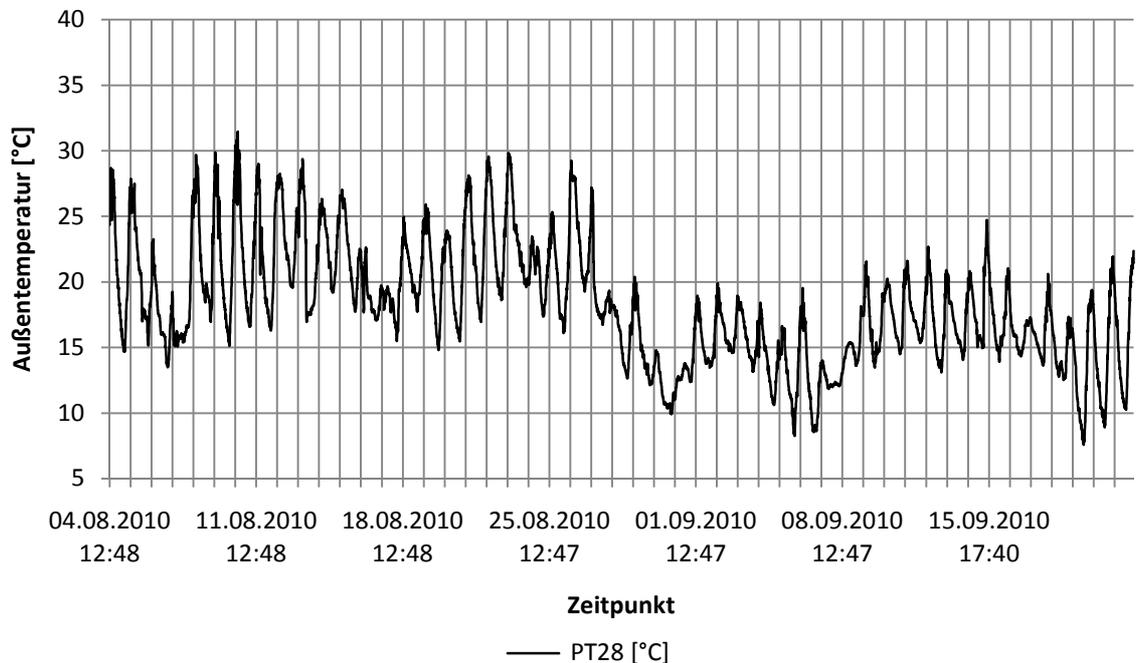


Abbildung 17: gemessener Außentemperaturverlauf (PT28) von 4.8.2010 bis 22.9.2010

5.3.1. Analyse anhand der gemessenen Temperaturen

Wie schon erwähnt ist das für den Benutzer wichtigste Kriterium, im Bezug auf die Behaglichkeit an warmen Sommertagen, die sich einstellende operative Raumtemperatur. In den Abbildungen 18 bis 21 werden die gemessenen operativen Raumtemperaturen mit der gemessenen Außenlufttemperatur für den Zeitraum von 5.8.2010 bis 2.9.2010 verglichen.

Auf Grund der uneinheitlichen Randbedingungen der drei Räume lassen sich aus der alleinigen Betrachtung der Temperaturverläufe keine genaueren Erkenntnisse ableiten. Es bedarf einer Untersuchung der gemessenen Wärmestromverläufe.

Anmerkung:

Die von der Norm vorausgesetzte Belüftung der Räume durch geöffnete Fenster während der Nacht wird nicht eingehalten. Besonders in Bürogebäuden ist das Öffnen der Fenster in der Nacht oft schwierig zu realisieren.

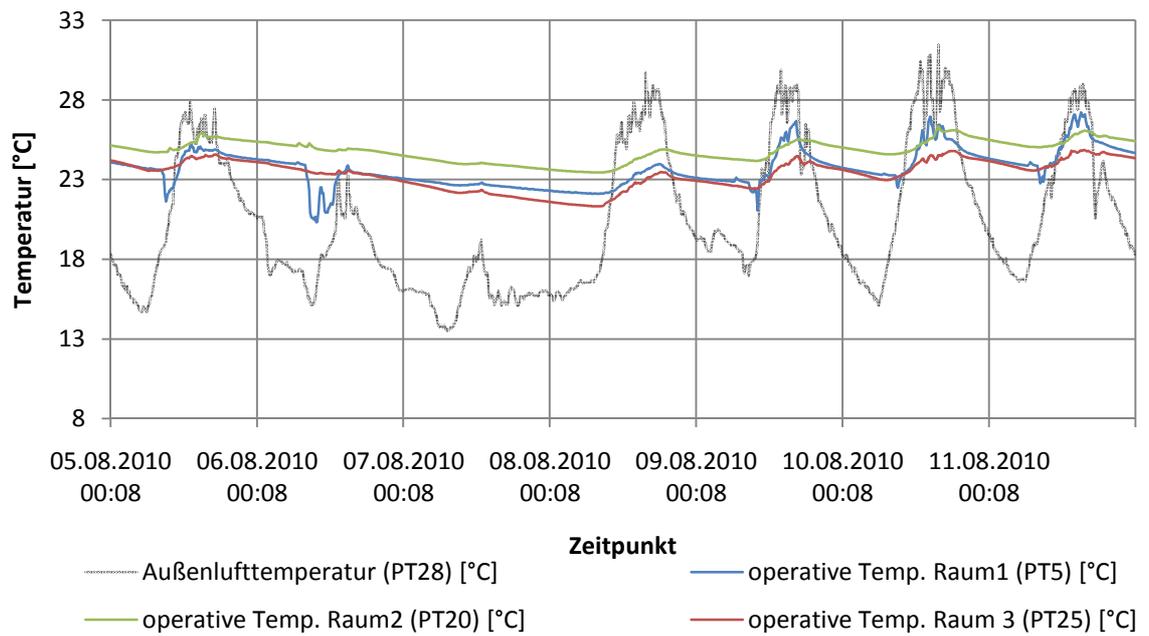


Abbildung 18: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 5.8.2010 bis 11.8.2010

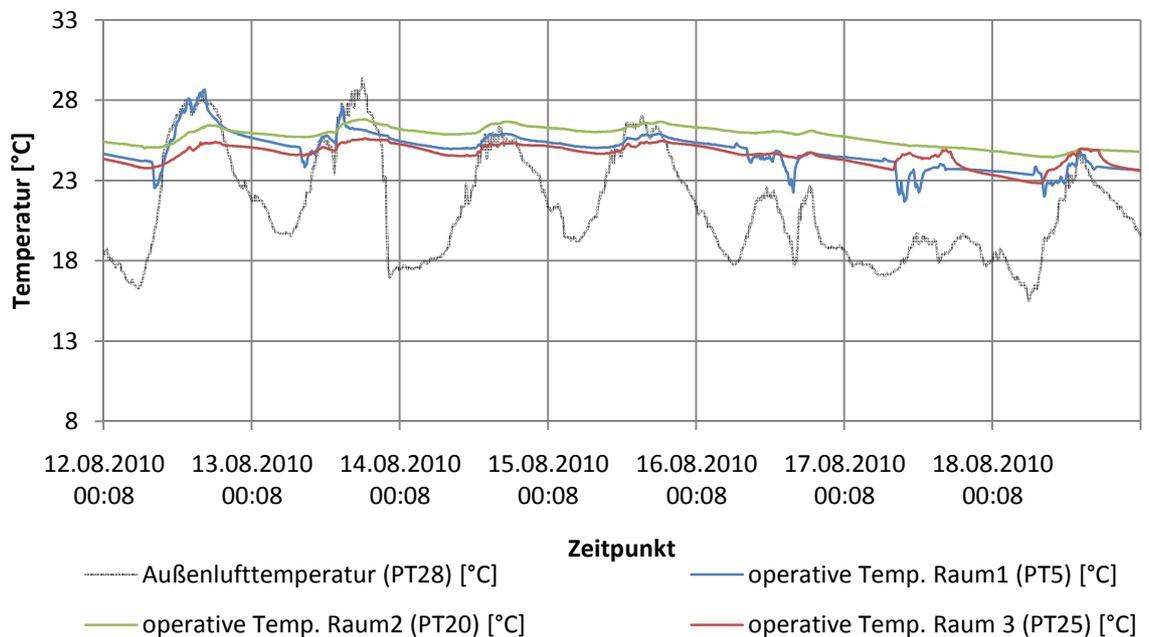


Abbildung 19: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 12.8.2010 bis 18.8.2010

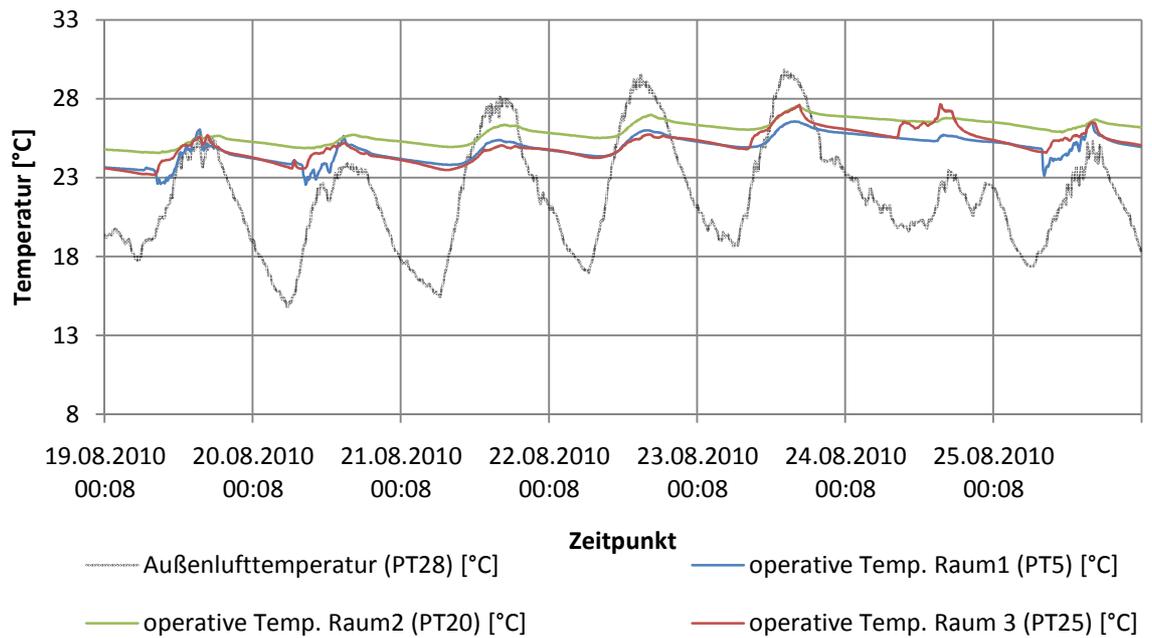


Abbildung 20: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 19.8.2010 bis 25.8.2010

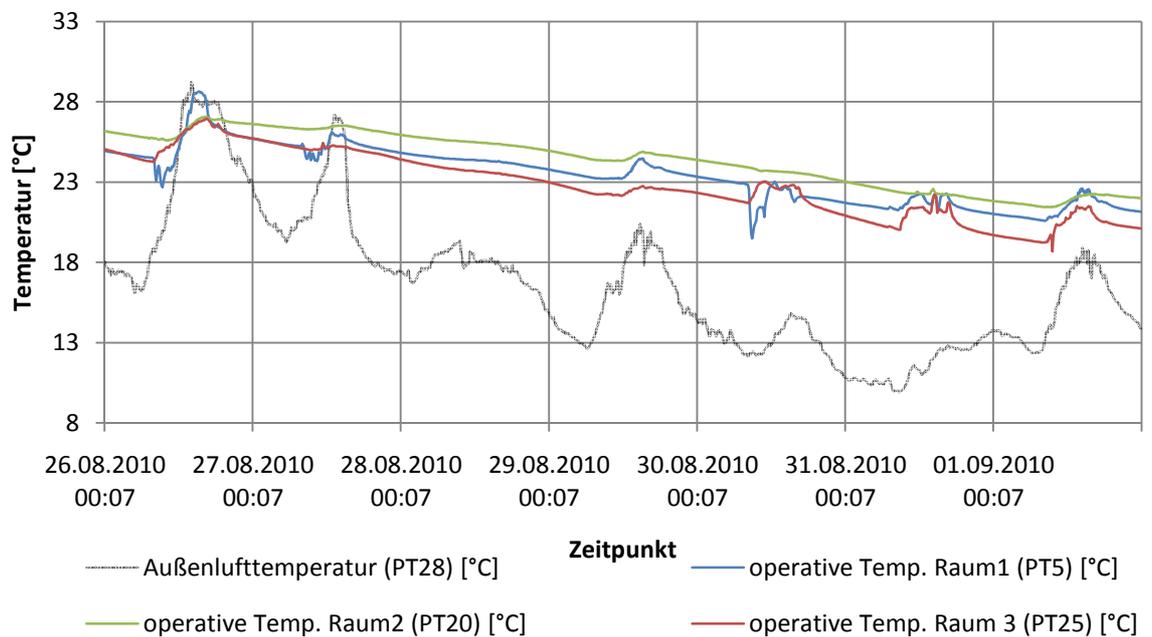


Abbildung 21: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 26.8.2010 bis 1.9.2010

Das Balkendiagramm in Abbildung 22 zeigt einen Vergleich der durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen in den drei Räumen zur gemessenen Außentemperatur.

Es ist auffällig, dass die mittlere Außentemperatur trotz der hohen Tagesspitzen niedriger ist als die durchschnittlichen Innenraumtemperaturen.

In Raum 2 stellt sich im Mittel die höchste operative Raumtemperatur ein. Nur hier liegt die Temperatur im Durchschnitt über 25 °C. In Kapitel 5 wurde erwähnt, dass der Computer, welcher mit den Messsensoren verbunden ist und die Daten aufzeichnet, in Raum 2 positioniert ist. Die erhöhte operative Raumtemperatur ist auf die durch diesen Computer erzeugte Wärmeenergie zurückzuführen. Unter Beachtung der Formel zur Berechnung der Wärmestromdichte

$$q = U \cdot (T_i - T_e) \quad (5.1)$$

q	Wärmestromdichte [W/m ²]
U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² K]
T _i	operative Raumtemperatur [K]
T _e	Außenlufttemperatur [K]

kann man schließen, dass bei gleichem U-Wert (der Räume 1 und 2) aber größerer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, in Raum 2 eine betragsmäßig höhere Wärmestromdichte gemessen werden kann als in Raum 1. Die anschließende Analyse der Wärmeströme belegt diese Aussage.

Da die operativen Raumtemperaturen in Raum 1 und Raum 3 aber annähernd gleich hoch sind, werden die Messergebnisse bezüglich des Wärmestroms hier gut vergleichbar sein.

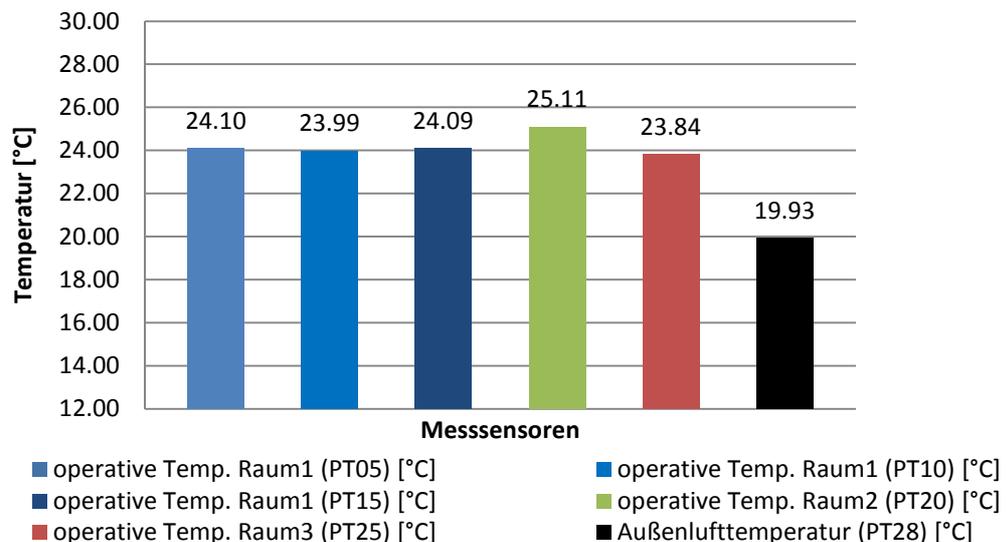


Abbildung 22: Vergleich zwischen den operativen Innenraumtemperaturen und der Außenlufttemperatur als Durchschnitt über den Zeitraum von 5.8.2010 bis 2.9.2010

5.3.2. Analyse anhand der gemessenen Wärmeströme

Die Untersuchung der gemessenen Wärmeströme lässt eine zuverlässige Aussage über die Leistungsfähigkeit der betrachteten Wandaufbauten zur Begrenzung sommerlicher Überwärmung zu.

In Anlehnung an die Analyse der gemessenen Temperaturen werden nun die Verläufe der gemessenen Wärmestromdichten untersucht.

Anhand der Wärmestrommessfolien Q7 und Q8 soll die prinzipielle Funktionsweise von Wärmestrommessfolien erläutert werden. Abbildung 23 zeigt die gemessenen Wärmestromdichten Q7 und Q8 (Raum 3) im Vergleich zur Oberflächentemperatur im Bereich der Messfolien (PT21) und der Raumlufttemperatur knapp über der Bauteiloberfläche (PT26). Ist die Oberflächentemperatur zu einem beliebigen Zeitpunkt höher als die Lufttemperatur, so wird ein positiver Wärmestrom gemessen. Der Wärmestrom verläuft in diesem Fall von außen nach innen. Verfolgt man den Verlauf der Temperaturen im Diagramm weiter, kommt man zu einem Schnittpunkt der blauen und der grünen Linie. Zu diesem Zeitpunkt sind Oberflächen- und Lufttemperatur gleich groß und die Wärmestromdichte wird daher Null. In diesem Moment findet kein Wärmetransport durch den betrachteten Bauteilquerschnitt statt. Erst wenn die Oberflächentemperatur unter die Lufttemperatur sinkt stellt sich erneut ein Wärmetransport ein. Die Richtung des Wärmestroms verläuft dann von innen nach außen.

Folgende Vorzeichenkonvention kann für die folgenden Vergleiche der Wärmestromdichten festgelegt werden:

- Wärmetransport von innen nach außen: negative Wärmestromdichte
- Wärmetransport von außen nach innen: positive Wärmestromdichte

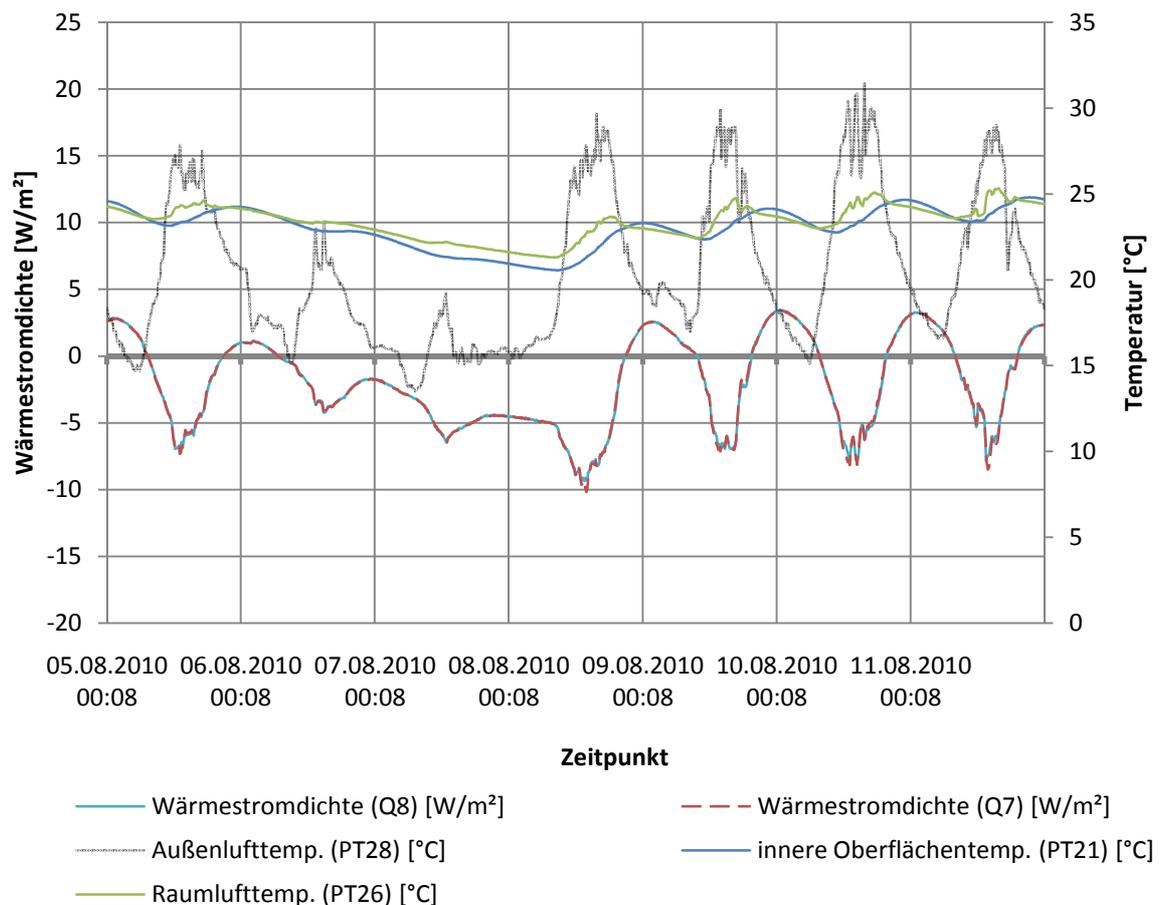


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen den gemessenen Wärmestromdichten Q7 und Q8 (Raum 3 - ohne WDVS) und den dort gemessenen Temperaturen; dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

Dasselbe Diagramm wie in Abbildung 23, nur für einen Querschnitt des WDVS ist in Abbildung 24 dargestellt. Auch hier wird der Wärmestrom (Q3 & Q4) in Beziehung zu den Temperaturen an der inneren Bauteiloberfläche (PT11) und der Raumluft (PT12) gesetzt. Die Außentemperatur (PT28) ist ebenfalls aufgetragen. Beachtenswert ist der extrem hohe positive Ausschlag im Verlauf der Wärmestromdichte am 6.8.2010. Ein Blick auf die gemessenen Temperaturen zu diesem Zeitpunkt gibt Aufschluss über den Grund der Unstetigkeitsstelle. Eine plötzliche Absenkung der Raumlufttemperatur, vermutlich hervorgerufen durch morgendliches Lüften, hat den Wärmestrom von außen nach innen kurzfristig stark ansteigen lassen. Vor allem im Zeitraum von 7.8.2010 bis 8.8.2010 lässt sich die Auswirkung der zusätzlichen Dämmebene sehr gut erkennen. Während die in Abbildung 23 dargestellten Wärmestromdichten zu diesem Zeitpunkt bei rund 5 W/m² liegen, wurden am WDVS lediglich Wärmestromdichten von ca. 1 W/m² gemessen. Die positive Eigenschaft von Dämmstoffen, den Wärmetransport von innen nach außen an kalten Tagen zu reduzieren, kann also belegt werden.

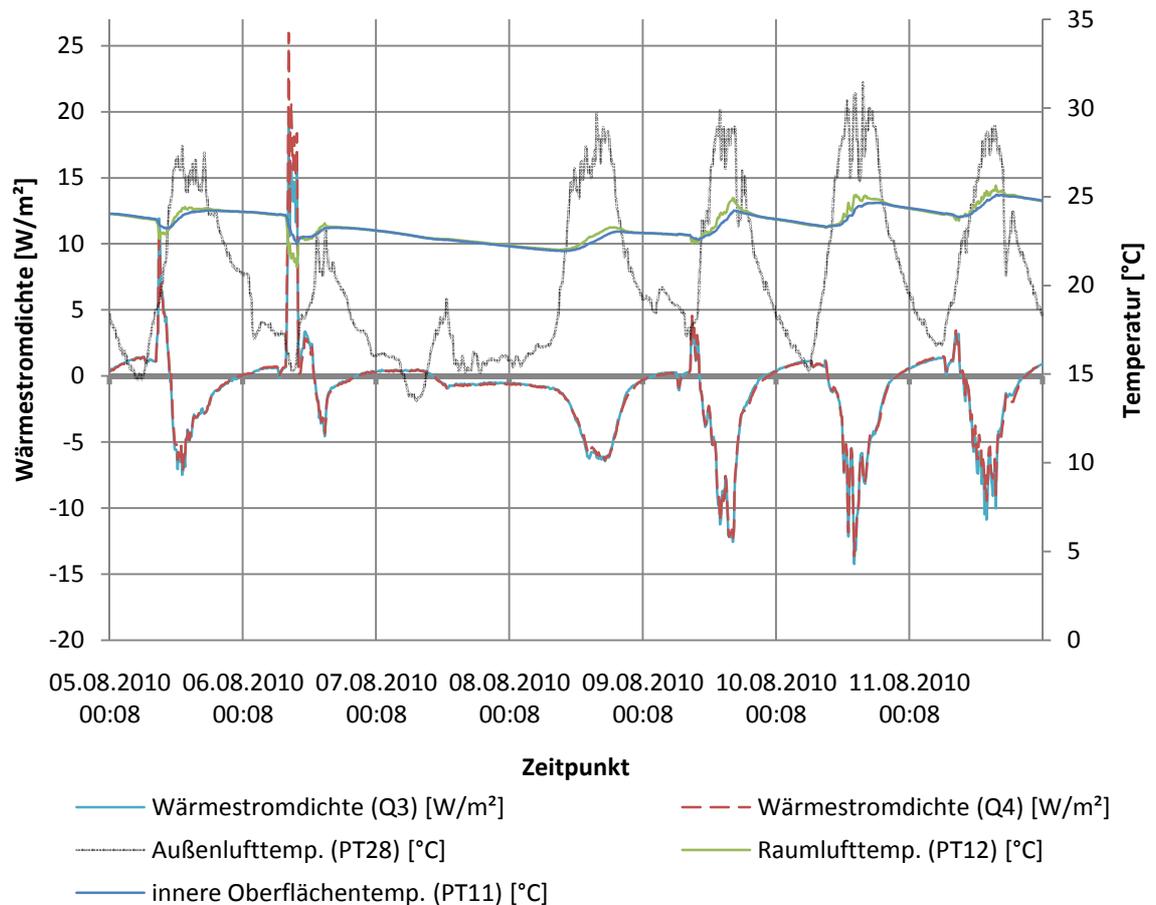


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen den gemessenen Wärmestromdichten Q3 und Q4 (Raum 1 - mit WDVS) und den dort gemessenen Temperaturen; dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

Auffällig ist die gute Übereinstimmung der gemessenen Wärmestromdichten innerhalb der einzelnen Räume. Sowohl in Abbildung 23, also auch in Abbildung 24 sind die zusammengehörigen Wärmeströme annähernd ident. Aus diesem Grund wird in den folgenden Abbildungen auf die Darstellung aller Wärmestromverläufe verzichtet. Die Diagramme würden unübersichtlich werden und an Aussagekraft verlieren.

In den Abbildungen 25 bis 28 werden die von den Wärmestrommessfolien Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS) gemessenen Wärmestromverläufe für den Zeitraum von 5.8.2010 bis 2.9.2010 dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, werden in jedem Diagramm nur sieben Tage abgebildet. Die nächsten sieben Tage sind dann im darauffolgenden Diagramm zu finden.

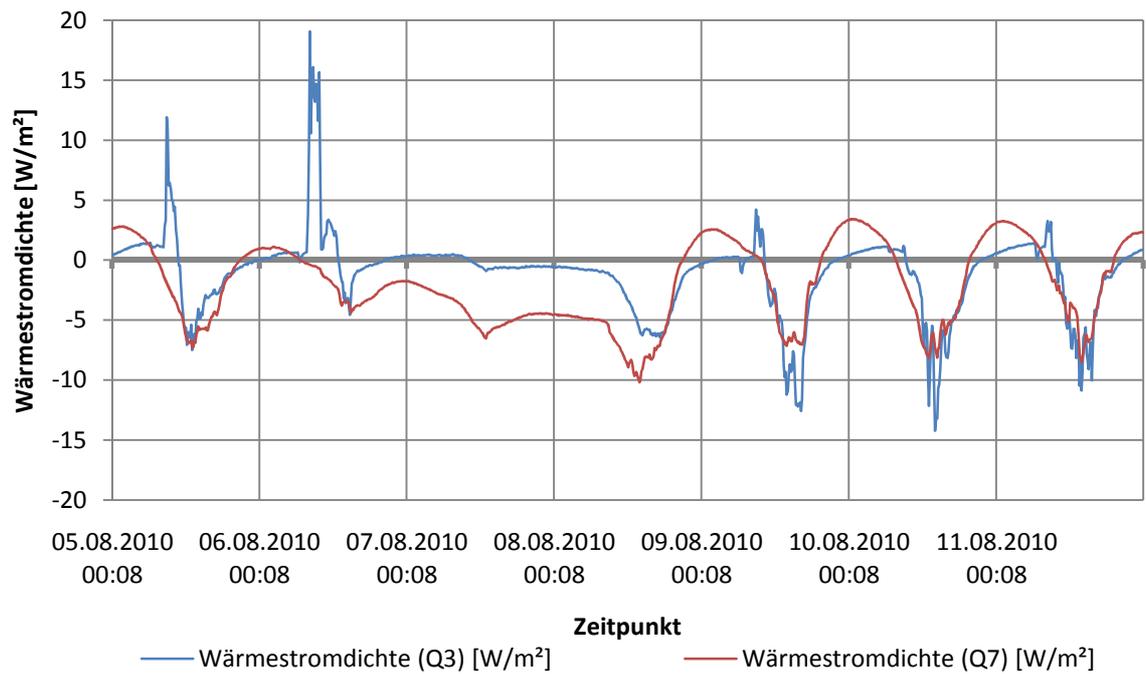


Abbildung 25: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

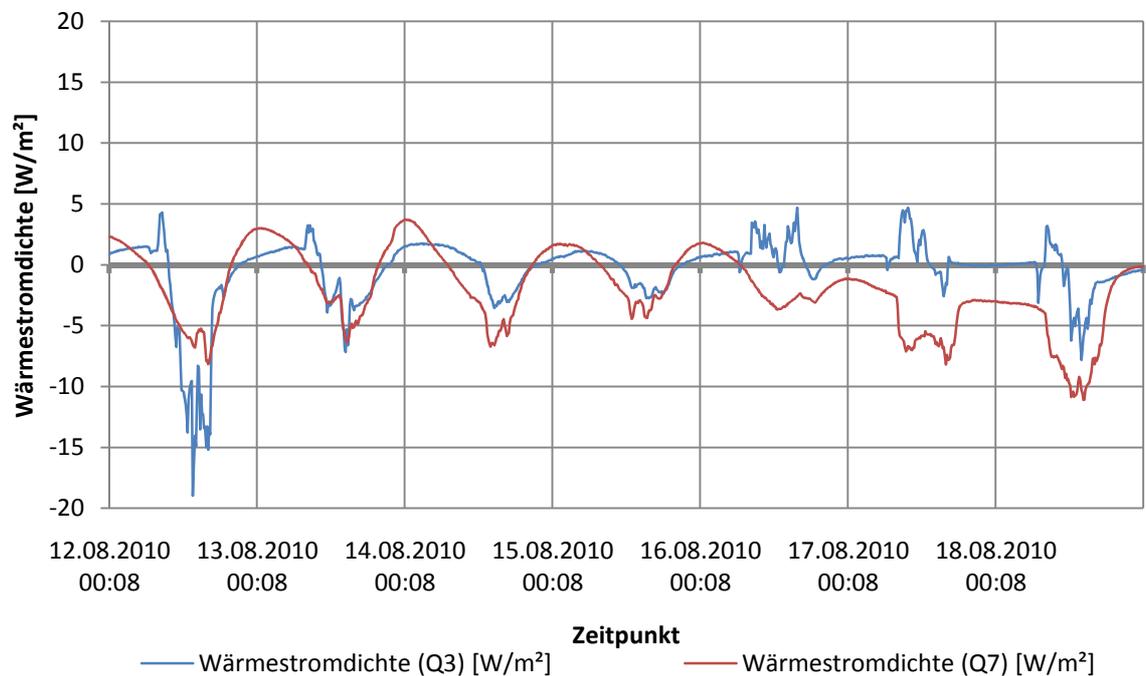


Abbildung 26: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 12.8.2010 bis 18.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

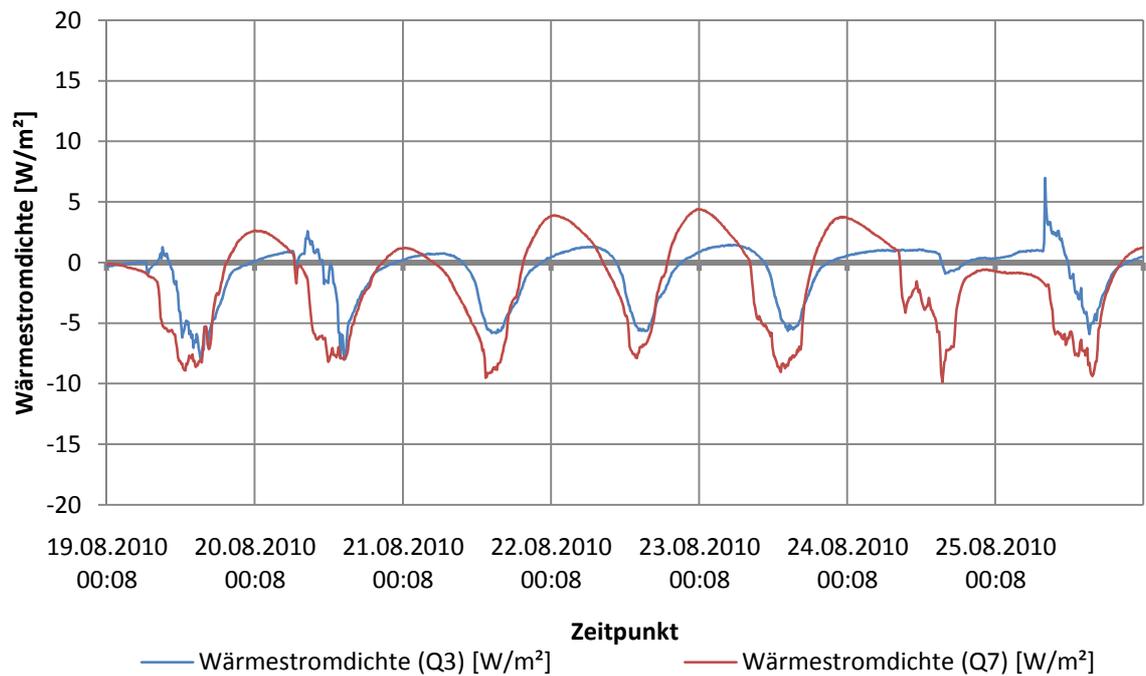


Abbildung 27: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 19.8.2010 bis 25.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

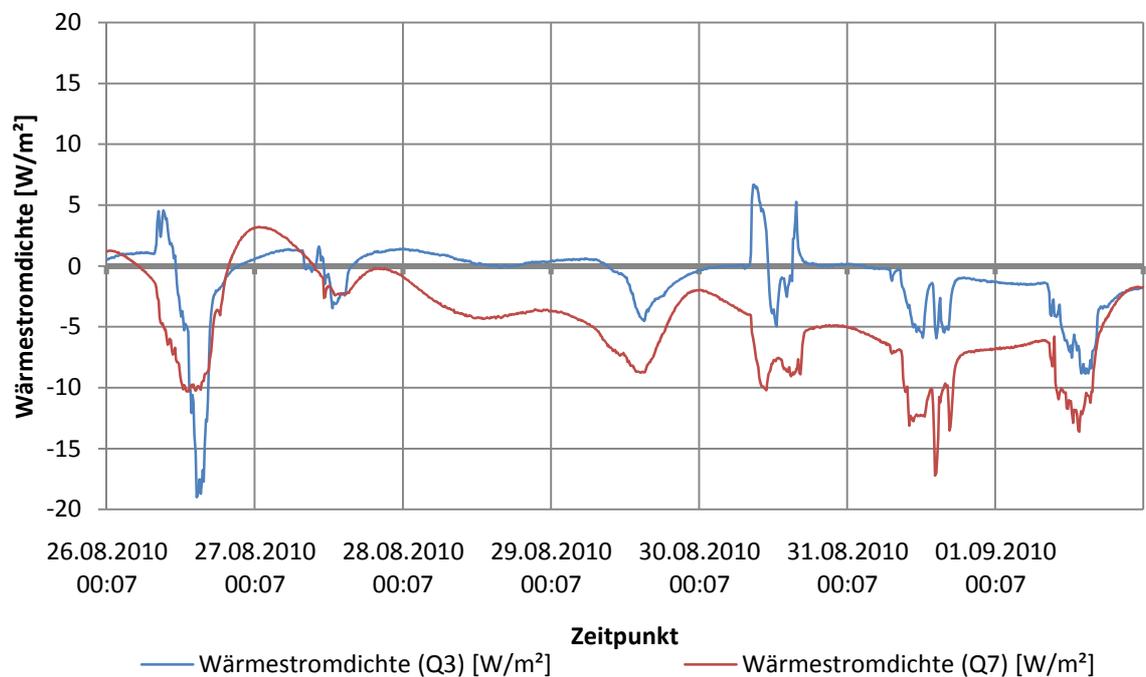


Abbildung 28: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 26.8.2010 bis 1.9.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

Die in den Abbildungen 25 bis 28 blau dargestellte Linie beschreibt den Wärmestromdichteverlauf, der am WDVS gemessen wurde. Die rote Linie zeigt die am Wandaufbau ohne zusätzliche Dämmebene gemessene Wärmestromdichte. Betrachtet man die Verläufe über die gesamte abgebildete Zeitspanne, erkennt man, dass die rote Linie wesentlich stärker um die X-Achse ausschlägt. D.h. die gemessenen Wärmestromdichten sind sowohl im positiven, als auch im negativen Bereich (betraglich) höher als bei der blauen Linie. Durch das WDVS wird der Wärmetransport in beide Richtungen reduziert.

In Abbildung 29 ist die Integration der Wärmestromverläufe über den Zeitraum von 4.8.2010 bis 22.9.2010 dargestellt. Die kumulierten Verläufe der Wärmestromdichte in Wh/m² sind für alle Messpositionen abgebildet. Von Beginn der Messungen an verläuft die kumulierte Wärmestromdichte an allen Messpositionen mit relativ konstanter negativer Steigung bis Anfang September. Zu diesem Zeitpunkt fallen die Außentemperaturen um einige Grade. Mit dem Abfall der Außentemperaturen wird mehr Wärme von innen nach außen transportiert und eine größere negative Steigung der kumulierten Wärmestromdichte stellt sich ein. Aus diesem Grund werden in den Untersuchungen auch vorrangig die Messergebnisse der ersten vier Wochen (5.8.2010 bis 2.9.2010) behandelt. Im September bewegen sich die Außentemperaturen nicht mehr in einem Bereich, der für die Untersuchung der sommerlichen Überwärmung repräsentative Ergebnisse liefert.

Es lässt sich aus der Abbildung also folgendes ableiten:

Umso kälter die Außentemperaturen werden, umso größer ist der Wärmestrom von innen nach außen. Bei hohen Außentemperaturen wird der Wärmetransport (als Tagesmittelwert) sehr gering. Während der Messungen nimmt die Wärmetransportbilanz eines Tages jedoch nie positive Werte an. Der mittlere Wärmestrom verläuft somit immer von innen nach außen.

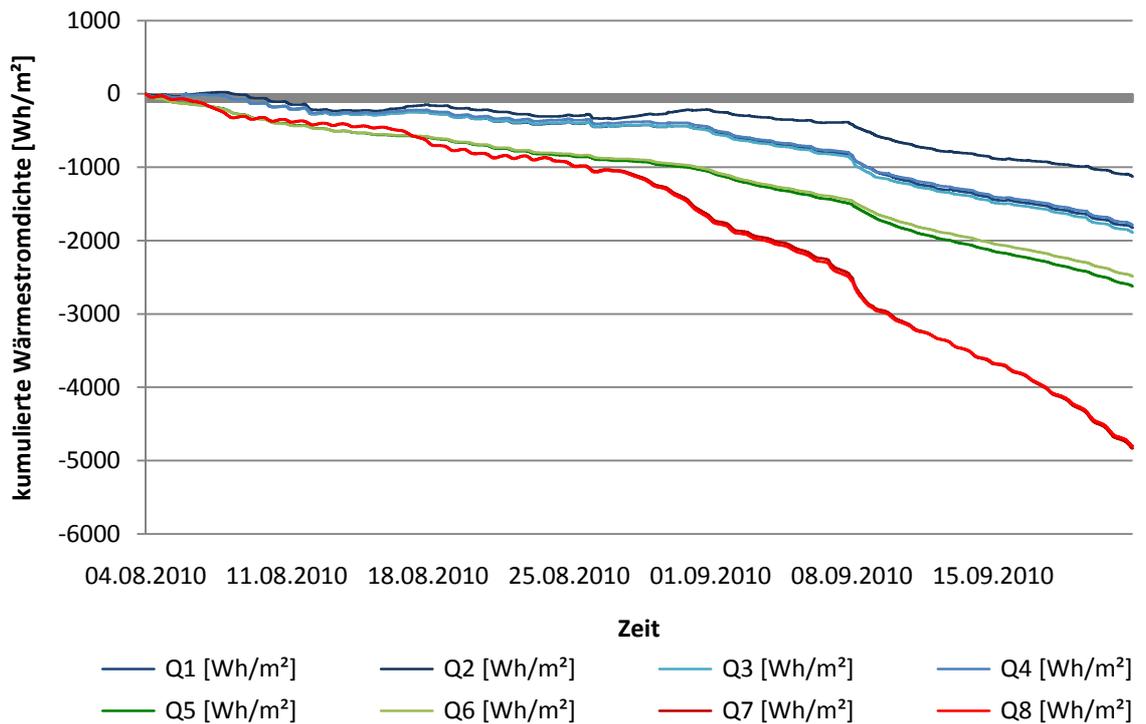


Abbildung 29: Darstellung der über den Zeitraum von 4.8.2010 bis 22.9.2010 integrierten Wärmestromdichteverläufe der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum3 ohne WDVS).

Vorzeichenkonvention: negativer Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von innen nach außen

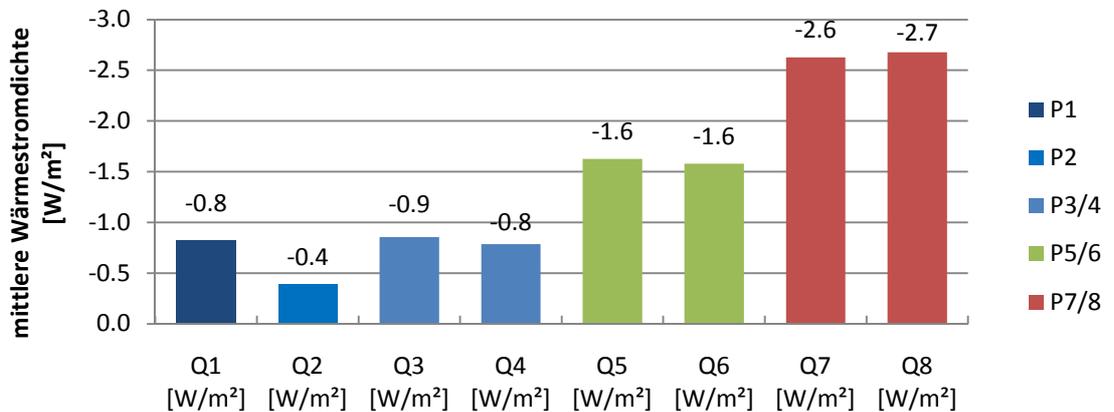


Abbildung 30: Vergleich der von 5.8.2010 bis 22.9.2010 durchschnittlich gemessenen Wärmestromdichten der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum 3 – ohne WDVS)

Vorzeichenkonvention: negativer Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von innen nach außen

Das Balkendiagramm (Abbildung 30) zeigt die durchschnittlich gemessenen Wärmestromdichten der einzelnen Messpositionen während des Zeitraums von 5.8.2010 bis 2.9.2010.

Am Wandaufbau ohne zusätzliche Dämmebene (Position P7/8) wird eine Wärmestromdichte von durchschnittlich $-2,7 \text{ W/m}^2$ gemessen. Im Vergleich dazu wird von den übrigen Wärmestrommessfolien (Position: P1, P2, P3/4, P5/6) ein wesentlich geringerer Wärmestrom gemessen. Hier wirkt sich die aufgebrachte EPS-Dämmebene eindeutig als zusätzlicher Widerstand gegen den Wärmetransport aus.

Während die Messergebnisse der Wärmestrommessfolien Q1, Q3 und Q4 sehr eng beisammen liegen (zwischen $-0,8 \text{ W/m}^2$ und $-0,9 \text{ W/m}^2$), werden an den Messplatten Q5 und Q6 mit durchschnittlich $-1,6 \text{ W/m}^2$ gemessen. Der Grund dafür ist (wie schon oben erwähnt) die höhere Innentemperatur in Raum 2, welche durch den ständig laufenden Computer (Aufzeichnung der Messdaten) verursacht wird.

Es ist auffällig, dass gerade an Position P2 eine deutlich geringere Wärmestromdichte gemessen wird als an den anderen Wärmestrommessfolien in Raum 1. Die Ursache dafür ist die geringere Wärmeleitfähigkeit des Holzspanbetonmauerwerks, welches an der Position 2 vorliegt.

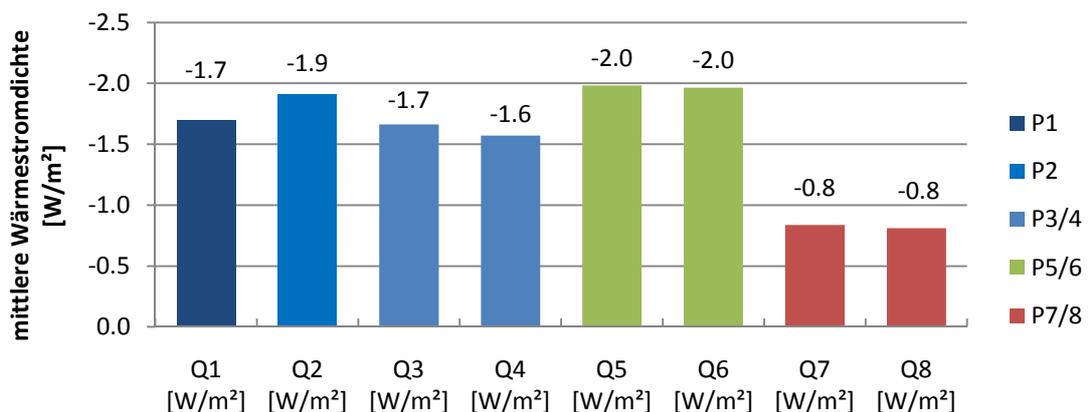


Abbildung 31: Vergleich der von 9.8.2010 bis 13.8.2010 durchschnittlich gemessenen Wärmestromdichten der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum 3 – ohne WDVS)

Vorzeichenkonvention: negativer Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von innen nach außen

Betrachtet man nun aber ausschließlich die fünf wärmsten Tage der Messperiode, so ergibt sich ein anderes Bild. Abbildung 31 zeigt die gemittelten Wärmeströme der einzelnen Messpositionen von 9.8.2010 bis 13.8.2010. Die Richtung des Wärmestroms verläuft immer noch von innen nach außen. Die Größenverhältnisse haben sich aber nun verschoben. In Summe wird nun durch den Wandaufbau ohne zusätzliche Dämmebene (Position P7/8) weniger Wärme transportiert, als durch die Wandaufbauten des WDVS (Positionen P1, P2, P3/4, P5/6). Was zunächst unlogisch

erscheint, wird durch den detaillierten Vergleich der Wärmestromverläufe während dieser Hitzeperiode verständlich. Wie schon zuvor werden in Abbildung 32 die an den Messfolien Q3 und Q7 gemessenen Wärmestromdichten verglichen, nun aber lediglich für den Zeitraum der Hitzeperiode von 9.8.2010 bis 13.8.2010. Während sich die negativen Werte im Diagramm bei den beiden Wandaufbauten kaum unterscheiden, ist ein wesentlich geringerer Wärmeeintrag von außen nach innen (positive Werte) am WDVS zuerkennen.

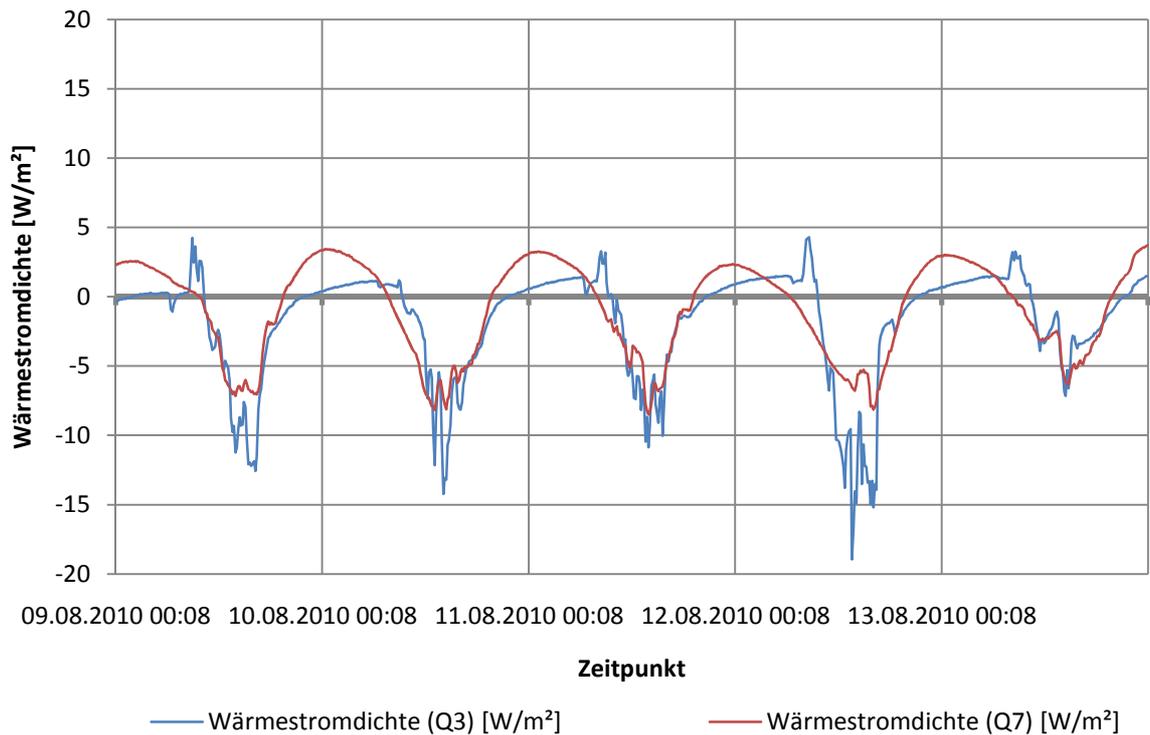


Abbildung 32: : Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS) während der Hitzeperiode von 9.8.2010 bis 13.8.2010

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

Das Experiment am Universitätsgebäude in Wien zeigt, dass auch im Sommer der mittlere Wärmestrom durch die opaken Bauteile von innen nach außen verläuft. Es wird durch diese Bauteile also mehr Wärme abtransportiert als eingetragen wird. Durch die Herstellung eines WDVS wird dem Abtransport von Wärme aus dem Gebäude ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt. Über einen längeren Zeitraum führt dieser Umstand zu höheren Durchschnittsraumtemperaturen.

Diese Erkenntnisse sind jedoch nur für den Durchschnitt über einen längeren Zeitraum zutreffend. Um die Temperaturspitzen zeitlich begrenzter Hitzeperioden abzdämpfen ist das WDVS ein durchaus geeignetes Mittel.

6. Numerische Untersuchung

In diesem Kapitel soll die Wirksamkeit eines WDVS anhand verschiedener numerischer Methoden untersucht werden. Das Kapitel lässt sich dabei in zwei Teilbereiche gliedern. Der erste Teil steht in engem Zusammenhang mit dem durchgeführten Versuch an dem Gebäude der TU Wien. Hier werden die im Experiment vorkommenden Wandaufbauten mit numerischen Methoden analysiert. Neben der Berechnung der stationären und effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten der im Experiment untersuchten Wandaufbauten, werden Bauteilsimulationen mit einem hygrothermischen Simulationsprogramm durchgeführt. Die Ergebnisse der Bauteilsimulation werden dann mit den Messergebnissen aus dem Versuch verglichen.

Im zweiten Teil dieses Kapitels werden thermische Gebäudesimulationen durchgeführt und die Ergebnisse daraus analysiert. Das Ziel dieser Gebäudesimulationen ist den Einfluss verschiedener Faktoren auf die sommerlichen Innenraumtemperaturen überprüfen zu können. Vor allem die Möglichkeit der nächtlichen Dauerlüftung und die Verschattung der Fensterflächen soll untersucht werden. Außerdem wird die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Klimaregionen überprüft.

Um die Versuchsergebnisse nachvollziehen zu können, sollen die Wärmetransportprozesse mit einem Bauteilsimulationsprogramm für den Messzeitraum nachsimuliert werden. Um mit einer Simulation realistische Ergebnisse erzielen zu können, ist es wichtig die Abfolge der Bauteilschichten und die jeweiligen Materialkennwerte korrekt anzunehmen. Nachdem der Schichtaufbau während der Versuchsvorbereitungen mit dem Endoskop festgestellt wurde, werden nun Annäherungen für die Materialkennwerte getroffen. Die in den Tabellen 3 bis 5 festgehaltenen Kennwerte sind der ÖNORM V31 [ONV] (Katalog für wärmeschutztechnische Rechenwerte für Baustoffe und Bauteile) entnommen.

Tabelle 3: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte der Wandaufbauten im Bereich der Wärmestrommessfolien Q1, Q3 & Q4, Q5 & Q6 (Positionen: P1, P3/4, P5/6)

Wandaufbau Position P1, P3/4, P5/6					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Rsi			0.130		
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
Hochlochziegel	0.22	0.3	0.733	800	800
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
Klebspachtel	0.025	0.8	0.031	1400	1100
EPS F-Plus	0.2	0.031	6.452	17	1450
Putz	0.01	0.8	0.013	1400	1100
Rse			0.059		
		Σ R	7.532		
	U-Wert:	0.132	[W/m²K]		

Tabelle 4: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte des Wandaufbaus im Bereich der Wärmestrommessfolie Q2 (Position: P2)

Wandaufbau P2					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Rsi			0.130		
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
Holzspanplatte	0.04	0.103	0.388	580	1470
Beton	0.14	0.24	0.583	1100	1130
Holzspanplatte	0.04	0.103	0.388	580	1470
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
Klebspachtel	0.025	0.8	0.031	1400	1100
EPS F-Plus	0.2	0.031	6.452	17	1450
Putz	0.01	0.8	0.013	1400	1100
Rse			0.059		
		Σ R	8.159		
	U-Wert:	0.123	[W/m²K]		

Tabelle 5: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte der Wandaufbauten im Bereich der Wärmestrommessfolien Q7 & Q8 (Position: P7/8)

Wandaufbau P7/8					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R _{si}			0.130		
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
Hochlochziegel	0.22	0.3	0.733	800	800
Kalkzementputz	0.04	0.7	0.057	1600	1100
R _{se}			0.059		
		ΣR	1.037		
	U-Wert:	0.918	[W/m²K]		

In Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Schichtdicken d , die Wärmeleitfähigkeiten λ , die resultierenden Wärmedurchlasswiderstände R , die Dichten ρ und die spezifischen Wärmekapazitäten c der vorkommenden Materialien, sowie die daraus resultierenden stationären Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) ausgewiesen.

Es sei darauf hingewiesen, dass für die Berechnung des stationären U-Wertes die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c keine Rolle spielen. Da diese aber Eingangsparameter für die später verwendete Bauteilsimulationssoftware (HAM3D) darstellen, werden die Werte der Vollständigkeit halber auch angeführt.

6.1. Bauteilsimulation

Um auszuschließen, dass die Messanlage bzw. einzelne Messsensoren einer Ungenauigkeit unterliegen, welche die Aussagekraft dieser Arbeit gefährden könnte, wird das thermische Verhalten der Bauteile in den Versuchsräumen in den anschließenden numerischen Untersuchungen für den Messzeitraum mit einer geeigneten Software nachsimuliert. Weichen die Ergebnisse aus Messung und Simulation stark von einander ab, so bedarf es einer detaillierten Ursachenforschung. Stimmen die Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit überein, so kann die Messanlage als validiert betrachtet werden. Umgekehrt kann in diesem Fall auch davon ausgegangen werden, dass die Simulationssoftware ordnungsgemäß funktioniert.

Das für die Bauteilsimulationen verwendete Programm nennt sich HAM3D und wird im Folgenden kurz vorgestellt.

6.1.1. Bauteilsimulationsprogramm HAM3D

Mit dem Simulationsprogramm HAM3D lässt sich das hygrothermische Verhalten von Bauteilen sowohl im ein- und zweidimensionalen, als auch im dreidimensionalen Raum beurteilen. Für gegebene Randbedingungen können die Wärmespeicherung, der Wärmetransport, die Feuchtespeicherung, der Feuchtetransport und der Lufttransport eines Bauteils ermittelt werden.

Um die klimatischen Verhältnisse während des Messzeitraumes abbilden zu können, werden aus den Messdaten Wetterdatensätze gebildet. Es wird sowohl für die Innenseite, als auch für die Außenseite eines Bauteils ein Wetterdatenfile benötigt. In Tabelle 6 sind die für thermische Simulationen relevanten Parameter und die jeweils dafür gewählten Werte aufgelistet. Während einige Werte direkt aus der Messung in die Inputdatei (Wetterdatenfile) des Simulationsprogrammes übernommen werden können, müssen jene Werte die von der Messanlage nicht gemessen werden, durch realistische Annahmen angenähert werden.

Tabelle 6: relevante Parameter des HAM3D Wetterdatenfiles

relevante Parameter	außen	innen
Lufttemperatur [°C]	entsprechender Wert aus Messung	entsprechender Wert aus Messung
konvektiver Übergangskoeffizient [W/m ² K]	15,0	2,5
Strahlungstemperatur des Himmels [°C]	entsprechender Wert aus Messung	entsprechender Wert aus Messung
effektiver Emissionsgrad [-]	0,8	0,9
solare Einstrahlung [W/m ²]	entsprechender Wert aus Messung	0,0
Absorptionsgrad [-]	0,3	0,2

Um die Geometrie eines Bauteils festzulegen, wird ein Gitterraster definiert. Anhand von Koordinateneingaben werden Blöcke erstellt, welchen Materialien zugewiesen werden. Die verwendeten Materialkennwerte (Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ , etc.) werden in einer eigenen Datei abgespeichert und sind in den Tabellen 3 bis 5 angeführt.

Wie schon erwähnt lassen sich mit HAM3D ein-, zwei- und dreidimensionale Problemstellungen behandeln. Da ein zweidimensionales Modell für die Nachbildung der geometrischen Verhältnisse der Versuchsräume sicherlich ausreichend genaue Ergebnisse liefert, kann auf die Verwendung eines dreidimensionalen Modells verzichtet werden. Ob man mit der eindimensionalen Betrachtung der Problemstellung ebenso das Auslangen findet, kann durch einen Vergleich zwischen den im Zuge des Versuchs gemessenen Wärmeströmen und den mit den verschiedenen Modellen nachsimulierten Wärmeströmen herausgefunden werden. Stimmen die Ergebnisse aus den Simulationen mit dem eindimensionalen Modell gleich gut mit der Realität überein wie die Ergebnisse aus den Simulationen mit dem zweidimensionalen Modell, liegt ein eindimensionaler Wärmetransportprozess vor. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um einen zweidimensionalen Transportprozess.

Die für die eindimensionale Simulation von den Bauteilen verwendeten Drahtgittermodelle sind Abbildung 33 zu entnehmen. Die detaillierteren, zweidimensionalen Drahtgittermodelle sind in Abbildung 34 zu dargestellt.

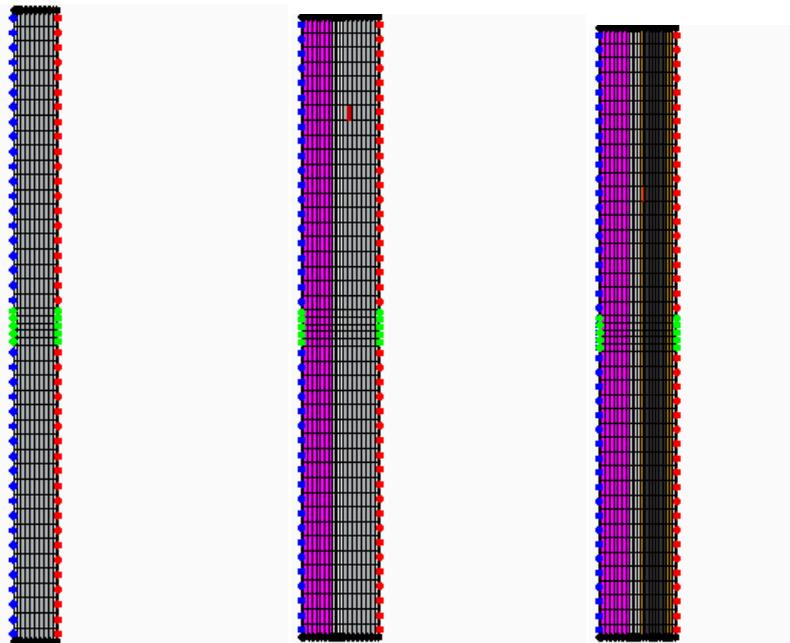


Abbildung 33: verwendete Drahtgittermodelle für eindimensionale Bauteilsimulationen mit HAM3D (links: Position P7/8, mitte: Position P1, P3/4, P5/6, rechts: Position P2)

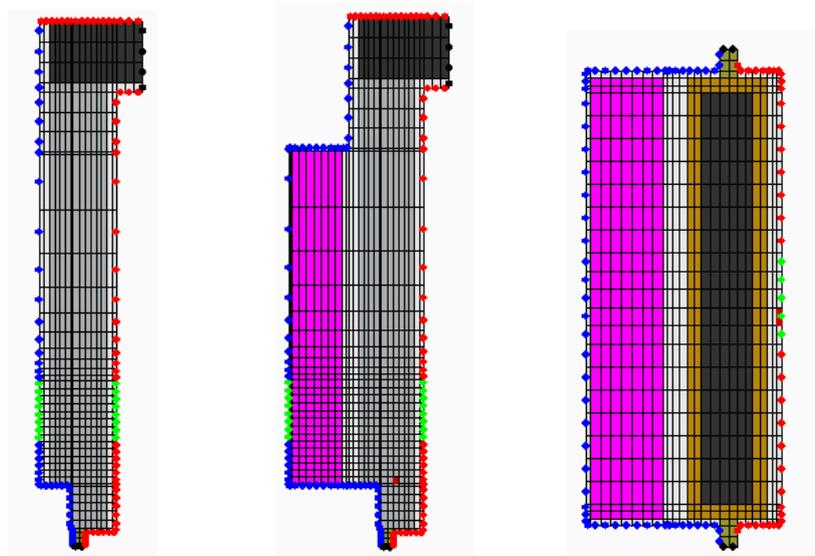


Abbildung 34: verwendete Drahtgittermodelle für zweidimensionale Bauteilsimulationen mit HAM3D (links: vertikaler Schnitt der Position P7/8, mitte: vertikaler Schnitt der Position P1, P3/4, P5/6, rechts: horizontaler Schnitt der Position P2)

6.1.2. Analyse der Ergebnisse aus der Bauteilsimulation

Durch einen Vergleich von Ergebnissen aus Simulation und Messung soll erkannt werden, ob das eindimensionale Simulationsmodell mit der gleichen Genauigkeit angewendet werden kann wie das zweidimensionale Modell bzw. ob die Ergebnisse aus der Simulation überhaupt die Realität widerspiegeln können.

In Abbildung 35 und Abbildung 36 werden nun exemplarisch die gemessenen und die simulierten Wärmeströme der Position P3/4 (Raum 1 – mit WDVS) und der Position P7/8 (Raum 3 – ohne WDVS) für den Zeitraum von 5.8.2010 bis 2.9.2010 verglichen. Neben den gemessenen Wärmestromverläufen $Q_{3_{\text{mess}}}$ bzw. $Q_{7_{\text{mess}}}$ und den mit dem zweidimensionalen Modell simulierten Wärmestromverläufen $Q_{3_{\text{sim},2D}}$ bzw. $Q_{7_{\text{sim},2D}}$ sind zusätzlich die mit dem eindimensionalen Modell simulierten Wärmestromverläufe $Q_{3_{\text{sim},1D}}$ bzw. $Q_{7_{\text{sim},1D}}$ abgebildet.

Während die in Abbildung 35 gezeigten Wärmestromverläufe der Position P7/8 eine sehr gute Übereinstimmung bieten, ist dies für die in Abbildung 36 dargestellten Wärmestromverläufe der Position P3/4 nur begrenzt der Fall. Zwar stimmen die Wärmestromverläufe $Q_{3_{\text{mess}}}$ und $Q_{3_{\text{sim},2D}}$ sehr gut überein, die eindimensionale Simulation ($Q_{3_{\text{sim},1D}}$) liefert jedoch in der letzten Woche des betrachteten Zeitraumes stark abweichende Wärmeströme. Obwohl auch das eindimensionale Modell die Realität (die Messergebnisse) über weite Strecken gut widerspiegelt, ist doch zu

erkennen, dass die zweidimensionale Simulation eine genauere Übereinstimmung mit den Messergebnissen liefert. Grund dafür sind geometrische Wärmebrücken, welche durch die Nähe der Wärmestrommessfolien (grüner Bereich in Abbildung 34) zu den Fensteröffnungen entstehen. Da die eindimensionale Simulation diese Wärmebrücken nicht berücksichtigt, die zweidimensionale aber schon, ist das Ergebnis der zweidimensionalen Simulation etwas genauer.

Die zweidimensionale Simulation bildet die Realität sowohl für den Wandaufbau ohne zusätzliche Dämmebene (Position P7/8), als auch für das WDVS (Position P1, P2, P3/4, P5/6) sehr gut ab. Im Rahmen der weiteren Analyse wird somit auf die Ergebnisse der auf dem zweidimensionalen Modell beruhenden Simulation zurückgegriffen.

Anmerkung:

Der in den Abbildungen 35 und 36 dargestellte Vergleich der Wärmestromverläufe aus Simulation und Messung für die Positionen P3/4 und P7/8 lässt sich für die Positionen P1, P2, P5/6 mit demselben Ergebnis durchführen.

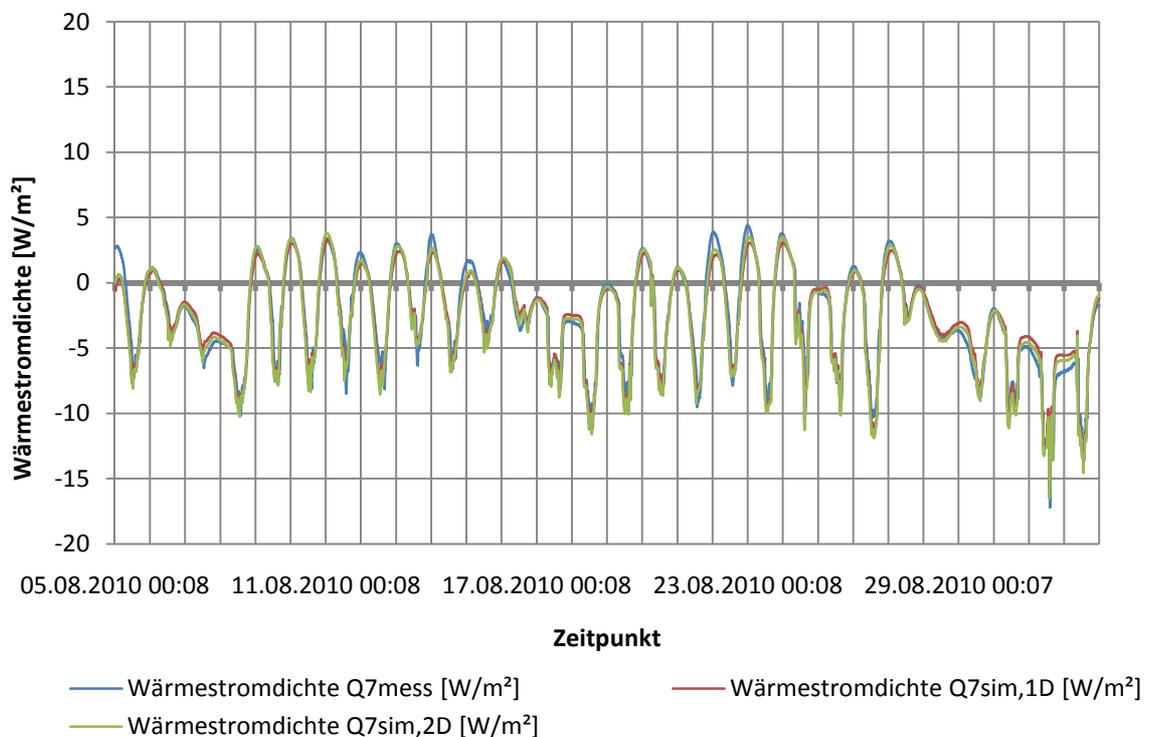


Abbildung 35: Vergleich zwischen gemessenem und ein- bzw. zweidimensional simuliertem Wärmestrom an der Position P7/8 (Raum 1 – ohne WDVS)

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

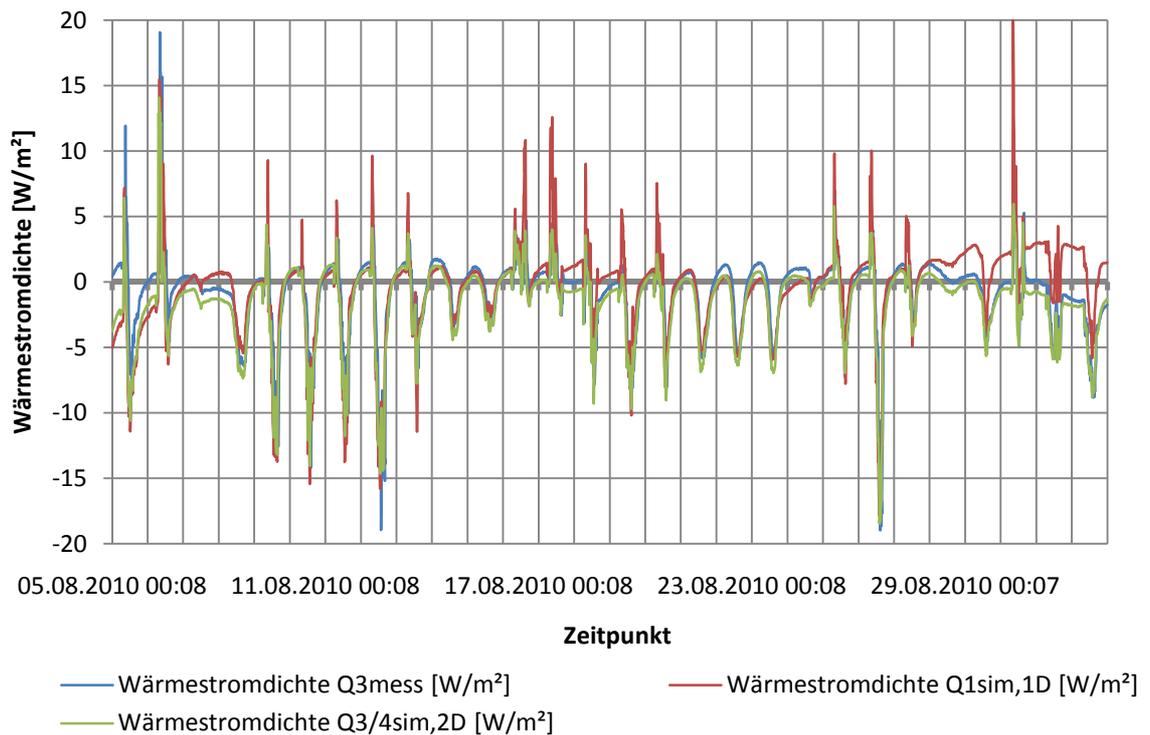


Abbildung 36: Vergleich zwischen gemessenem und ein- bzw. zweidimensional simuliertem Wärmestrom an der Position P3/4 (Raum 1 – mit WDVS)

Vorzeichenkonvention: positiver Wärmestrom bedeutet Wärmetransport von außen nach innen

Da die Ergebnisse aus den Messungen ziemlich genau mit den Ergebnissen aus der zweidimensionalen Simulation übereinstimmen (siehe Abbildung 35 und 36) werden die Ergebnisse aus der Bauteilsimulation hier nicht näher analysiert. Die Analyse würde sich kaum von der Analyse der Messergebnisse unterscheiden.

Unter der Annahme, dass die Bauteilsimulationssoftware HAM3D korrekt rechnet, wurde durch die gute Übereinstimmung von Simulation und Messung, die Messanlage validiert.

In weiterer Folge wird das Bauteilsimulationsprogramm HAM3D validiert.

6.1.3. Berechnung der effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten (U_{eff})

Durch die Herstellung des WDVS im Zuge der Vorbereitungen auf den Versuch wurde an den Außenwänden der Räume 1 und 2 der Wärmedurchgangskoeffizient verändert. Es soll nun untersucht werden, in welchem Ausmaß sich der U-Wert durch diese Maßnahme verändert hat.

Ein niedriger Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) bedeutet, dass dem Wärmeenergieausgleich zwischen Innen- und Außenseite ein großer Widerstand entgegengesetzt wird. Der Wandaufbau hat somit eine bessere Wärmedämmwirkung als ein Wandaufbau mit hohem U-Wert.

Die Analyse der Messergebnisse hat bereits gezeigt, dass die Wärmetransportprozesse durch opake Bauteile auch im Sommer vom Inneren eines Gebäudes nach außen verlaufen. Demnach wäre also ein hoher U-Wert, der den Abtransport von Wärmeenergie nach außen eher zulässt, einem Wandaufbau mit niedrigem U-Wert zu vorzuziehen.

In den Tabellen 3 bis 5 wurden bereits die stationären U-Werte der verschiedenen Wandaufbauten berechnet. Da jedoch gerade bei den großen Temperaturschwankungen im Sommer mit stark instationärem Verhalten zu rechnen ist, ist der stationäre U-Wert nicht besonders aussagekräftig. Aus diesem Grund wird nun der effektive Wärmedurchgangskoeffizient berechnet.

Wie anfangs (in Kapitel 2) bereits erwähnt wird der Wärmedurchgangskoeffizient grundsätzlich durch folgende Beziehung definiert [RIC08]:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \cdot t \quad \text{bzw.} \quad U = \frac{Q}{A \cdot (T_i - T_e) \cdot t} \quad (6.1)$$

Q	Wärmemenge [Wh]
U	U-Wert [W/m ² K]
A	betrachtete Fläche [m ²]
T _i	operative Raumtemperatur [K]
T _e	Außenlufttemperatur [K]
t	Dauer des betrachteten Zeitraums [h]

Die operative Raumtemperatur und die Außenlufttemperatur können den Messergebnissen entnommen werden. Mit den Sensoren PT05, PT10, PT15, PT20 und PT25 wurden die operativen Raumtemperaturen an den jeweiligen Messpositionen gemessen. Die Außenlufttemperatur wurde mit dem Sensor PT28 gemessen. Durch Bildung der Mittelwerte ergeben sich die operative Raumtemperatur T_i (für die einzelnen Positionen) und die Außenlufttemperatur T_e, welche dann zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten verwendet werden können.

In der Formel für die Berechnung des U-Werts bleibt somit lediglich die Wärmemenge Q unbekannt. Diese kann nun anhand der in Kapitel 2 (Grundlagen) angeführten Formeln zur Berechnung des Wärmetransportes durch opake Bauteile berechnet werden (Bezeichnung: Q_{calc}). Alternativ dazu besteht (nach der Durchführung der Bauteilsimulation) auch die Möglichkeit die Wärmemenge Q aus den eindimensionalen Simulationsergebnissen zu ermitteln (Bezeichnung: Q_{sim}).

Anmerkung:

Theoretisch ist es auch möglich die Wärmemenge Q aus den im Rahmen des Versuchs gemessenen Wärmestromdichten zu ermitteln. Die so errechneten U-Werte haben jedoch keine Aussagekraft, da die Wärmemenge Q maßgeblich durch die vorhandenen Wärmebrücken beeinflusst ist.

6.1.3.1. Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{eff,sim}}$

Wie erwähnt kann die Wärmemenge Q_{sim} aus den Ergebnissen der eindimensionalen Bauteilsimulation ermittelt werden. Sie ergibt sich aus der Bilanz der transportierten Wärmemenge über den Zeitraum von 4.8.2010 bis 22.9.2010. Q_{sim} ist somit jene aus dem Gebäude abtransportierte Wärmemenge, die den Wärmemengeneintrag in das Gebäude überschreitet. Um die Wärmemenge Q_{sim} zu ermitteln, wird der durchschnittliche Wärmestrom aus der Bauteilsimulation mit der Anzahl der Stunden des Messzeitraumes multipliziert. Durch Einsetzen der Werte in die Formel zur Berechnung des U-Werts ergeben sich die in Tabelle 7 dargestellten Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\text{eff,sim}}$.

Tabelle 7: simulierter effektiver U-Wert für den eindimensionalen Fall

Position	P1	P2	P3/4	P5/6	P7/8
Q_{sim} [Wh]	-900.71	-845.72	-886.47	-1053.30	-4855.24
$U_{\text{eff,sim}}$ [W/m ² K]	0.150	0.143	0.148	0.151	0.836

6.1.3.2. Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{eff,calc}}$

Die für die Berechnung des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten benötigte Wärmemenge Q kann auch anhand der in Kapitel 2 (Grundlagen) vorgestellten Formeln zur Ermittlung des Wärmetransportes durch opake Bauteile erfolgen.

Anmerkung:

Die mathematischen Beziehungen zur Berechnung des Wärmetransportes durch opake Bauteile wurden bereits im Kapitel 2 (Grundlagen) dieser Diplomarbeit behandelt. Da hier aber einige Werte genauer erklärt werden bzw. die Herkunft der verwendeten Werte erklärt wird, sind die Formeln hier noch einmal angeführt.

Die aus einem Gebäude transportierte Wärmemenge Q_{calc} setzt sich aus einem Anteil Transmission Q_{trans} und einem Anteil langwelliger Abstrahlung Q_{infra} zusammen und wird durch den solaren Eintrag von Wärmeenergie $Q_{\text{s,opak}}$ verringert [RIC08]:

$$Q_{\text{calc}} = Q_{\text{trans}} - Q_{\text{s,opak}} + Q_{\text{infra}} \quad (6.2)$$

Q_{trans}	Wärmemengentransport durch Transmission [Wh]
$Q_{\text{s,opak}}$	Wärmemengeneintrag durch solare Strahlung [Wh]
Q_{infra}	Wärmemengenverlust durch langwellige Abstrahlung [Wh]

Der Wärmemengentransport zufolge Transmission Q_{trans} wird nach folgender Formel berechnet [RIC08]:

$$Q_{\text{trans}} = U_{\text{stat}} \cdot (T_i - T_e) \cdot t \quad (6.3)$$

U_{stat}	stationärer U-Wert des jeweiligen Wandaufbaus [W/m ² K]
T_i	operative Raumtemperatur [°C]
T_e	Außenlufttemperatur [°C]
t	Dauer des betrachteten Zeitraums [h]

Der Eintrag an Wärmemenge durch Sonnenstrahlung $Q_{\text{s,opak}}$ über den betrachteten Zeitraum wird nach folgender Formel berechnet [RIC08]:

$$Q_{\text{s,opak}} = I_s \cdot F_s \cdot \alpha_{\text{sol}} \cdot R_{\text{se}} \cdot U_{\text{stat}} \quad (6.4)$$

I_s	solare Einstrahlung [Wh]
F_s	Verschattungsfaktor (gewählt: 1,0)
α_{sol}	Absorptionsgrad (gewählt: 0,8)
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [m^2K/W] (gewählt 0,051 m^2K/W)
U_{stat}	stationärer U-Wert des jeweiligen Wandaufbaus [W/m^2K]

Für die Größe der solaren Einstrahlung I_s werden die Messdaten der Pyranometer S01 und S02 herangezogen. Über den Messzeitraum wurde hier eine durchschnittliche Bestrahlung von 95,7 W gemessen. Multipliziert mit der Anzahl der Stunden des betrachteten Zeitraumes ergibt sich die solare Einstrahlung I_s zu rund 112300 Wh.

Der Wärmeübergangswiderstand R_{se} ist der Kehrwert aus der Summe des konvektiven Übergangskoeffizienten h_{cv} und dem Übergangskoeffizienten für Strahlung h_r . Während der konvektive Übergangskoeffizient mit 15 W/m^2K angenommen wurde, kann der Übergangskoeffizient für Strahlung h_r mit der Formel aus Kapitel 2 (Grundlagen) aus den Messergebnissen berechnet werden. Er ergibt sich zu ca. 4,5 W/m^2K . Bildet man nun den Kehrwert aus der Summe der beiden Übergangskoeffizienten, so erhält man den Wärmeübergangswiderstand R_{se} zu ca. 0,051 m^2K/W .

Der Infrarotstrahlungsaustausch zwischen Himmel und Oberfläche eines Bauteils Q_{infra} wird durch folgende Formel beschrieben [RIC08]:

$$Q_{infra} = F_{sky} \cdot \alpha_{infra} \cdot (T_e - T_{sky}) \cdot R_{se} \cdot U \cdot t \quad (6.5)$$

F_{sky}	sichtbarer Anteil des Himmels (gewählt: 0,5)
h_r	Übergangskoeffizient für Strahlung [W/m^2K] (gewählt: 4,5 W/m^2K)
T_{sky}	mittlere Himmelstemperatur [K]
T_e	Außenlufttemperatur [K]
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [m^2K/W] (gewählt 0,051 m^2K/W)

In der Literatur wird die Himmelstemperatur T_{sky} häufig um 10 K kälter als die Umgebungstemperatur angenommen. Die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Himmelstemperatur lässt sich jedoch auch aus den Messergebnissen der Strahlungssensoren ermitteln und ergibt sich zu ca. 8,75 K.

Durch Einsetzen der Werte in die angeführten Formeln lässt sich für jeden der fünf vorkommenden Wandaufbauten (P1, P2, P3/4, P5/6, P7/8) der Wärmemengentransport und schließlich der effektive Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{eff,calc}}$ berechnen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Zusammensetzung der Wärmemenge Q_{calc} , und der daraus errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\text{eff,calc}}$ für die verschiedenen Positionen

Position	P1	P2	P3/4	P5/6	P7/8
Q_{trans} [Wh]	794.46	725.17	791.42	923.55	5367.26
$Q_{\text{S,opak}}$ [Wh]	227.99	211.95	227.99	227.99	1597.18
Q_{infra} [Wh]	156.73	145.71	156.73	156.73	1097.98
Q_{calc} [Wh]	723.20	658.93	720.16	852.29	4868.06
$U_{\text{eff,calc}}$ [W/m ² K]	0.120	0.111	0.120	0.122	0.839

Abbildung 37 zeigt einen Vergleich der an den unterschiedlichen Messpositionen, mit den verschiedenen Methoden, ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\text{eff,sim}}$, $U_{\text{eff,calc}}$ und U_{stat} . Es ist ersichtlich, dass die Wandaufbauten mit WDVS (P1, P2, P3/4, P5/6) einen wesentlich geringeren Wärmetransport zulassen. Im Vergleich dazu ist der U-Wert des Wandaufbaus ohne zusätzliche Dämmung (P7/8) im Durchschnitt um den Faktor 6,5 höher.

Das Ergebnis kommt nicht unerwartet, werden WDVS doch seit Jahrzehnten zur Vergrößerung des Widerstandes gegen den Wärmetransport durch Bauteile eingesetzt. Während der Wintermonate tragen WDVS somit sicherlich zur Begrenzung des Heizwärmebedarfs bei.

Der eigentliche Grund weshalb die U-Wert Berechnungen überhaupt durchgeführt wurden, ist der Vergleich zwischen den verschiedenen angewandten Berechnungsmethoden. Stimmen die Ergebnisse der simulierten effektiven U-Werte $U_{\text{eff,sim}}$ und die Ergebnisse der anhand der Formeln für den Wärmetransport durch opake Bauteile berechneten U-Werte $U_{\text{eff,calc}}$ überein, wurde das Simulationsprogramm HAM3D erfolgreich validiert.

Betrachtet man in Abbildung 37 die Position P7/8 so fällt die genaue Übereinstimmung von $U_{\text{eff,sim}}$ und $U_{\text{eff,calc}}$ auf. Bei der Berechnung des stationären U-Werts werden die solare Einstrahlung und der Infrarotstrahlungsaustausch nicht berücksichtigt. Da diese

aber in Summe die Bilanz der transportierten Wärmemenge (und somit auch den U-Wert) reduzieren, ist der stationär berechnete Wärmedurchgangskoeffizient U_{stat} höher.

An den Messpositionen P1, P2, P3/4 und P5/6 ist die Übereinstimmung zwischen den U-Werten aus Simulation und Messung nicht so exakt. Vermutlich stimmt einer der für das WDVS angenommenen Materialkennwerte nicht exakt mit der Realität überein. Die Werkstoffeigenschaften der verwendeten Materialien können im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt werden und so müssen die Angaben der Produktdatenblätter als korrekt angesehen werden.

Der entstehende Fehler beträgt aber auch an den Positionen P1, P2, P3/4 und P5/6 nur rund $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$. Das in der Bauteilsimulation verwendete Modell kann somit als richtig angenommen werden und das Simulationsprogramm HAM3D wurde validiert.

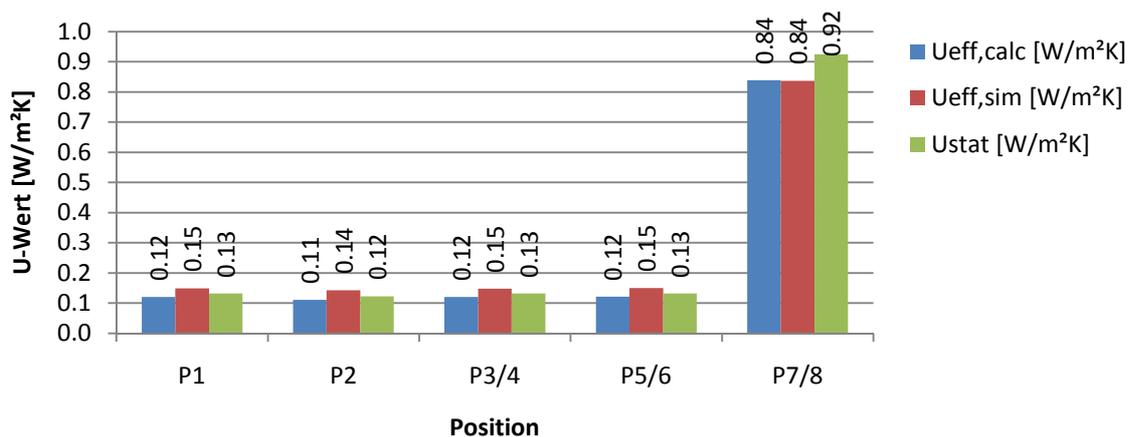


Abbildung 37: Vergleich des stationären U-Werts U_{stat} mit dem effektiven U-Wert aus der Bauteilsimulation $U_{\text{eff,sim}}$ und dem unter Berücksichtigung der solaren Einstrahlung und der Infrarotabstrahlung berechneten effektiven U-Wert $U_{\text{eff,calc}}$

6.2. Gebäudesimulation

Die Analyse des durchgeführten Versuchs hat gezeigt, dass der Abtransport von Wärme durch die opaken Bauteile eines Gebäudes größer ist als der Wärmeeintrag durch diese. Die durchschnittliche Innenraumtemperatur muss somit nach der Herstellung eines WDVS höher liegen als davor. Das Experiment hat aber auch gezeigt, dass der maximale Wärmeeintrag in ein Gebäude während einer Hitzeperiode durch WDVS reduziert wird. Obwohl die durchschnittliche Raumtemperatur also in einem Gebäude mit WDVS höher liegen wird, als in einem Gebäude ohne WDVS, können die Temperaturspitzen während einer Hitzeperiode durch WDVS reduziert werden.

Die Auswirkungen von nächtlichem Dauerlüften über geöffnete Fenster konnte durch das messtechnische Experiment nicht überprüft werden. Da dies aber aufgrund der niedrigeren Außentemperaturen in der Nacht eine sinnvolle Möglichkeit darstellt um die Raumtemperaturen zu senken, wird in diesem Kapitel auch der Einfluss nächtlicher Dauerlüftung untersucht. Außerdem wird überprüft ob die Verschattung von Fensterflächen (z.B. außenliegende Jalousien) Auswirkungen auf die Temperaturen im Inneren eines Gebäudes hat.

Die Untersuchungen in diesem Teil der Arbeit werden mit einem Gebäudesimulationsprogramm durchgeführt. Eine Gebäudesimulation hat den Vorteil, dass unter völlig identen Randbedingungen einzelne Faktoren variiert werden können und so deren Einfluss auf das Ergebnis festgestellt werden kann.

Abbildung 38 zeigt die untersuchten Variantenkombinationen für die Gebäudesimulation. Die in der Abbildung eingeführte Nomenklatur der Varianten wird in den anschließenden Untersuchungen weiter verwendet.

Da primär der Einfluss von WDVS auf das Gebäudeverhalten festgestellt werden soll, werden alle Simulationen einmal für Außenwände mit WDVS und einmal für Außenwände ohne WDVS durchgeführt. Für diese beiden Grundvarianten werden die Raumtemperaturen einmal ohne Lüftung und ohne Verschattung (z.B. „Wien_mD_1“), einmal mit Lüftung und ohne Verschattung (z.B. „Wien_mD_2“) und einmal mit Lüftung und mit Verschattung berechnet (z.B. „Wien_mD_3“). Es ergeben sich somit sechs Simulationsvarianten. Um überprüfen zu können ob die gewonnen Erkenntnisse für verschiedene klimatische Bedingungen zutreffend sind, werden die Simulationen in diesem Teil der Arbeit für vier verschiedene Gebäudestandorte durchgeführt. Das thermische Verhalten des Gebäudes wird für die klimatischen Randbedingungen der

Städte Wien (Österreich), Varna (Bulgarien), Sofia (Bulgarien) und Izmir (Türkei) untersucht. Die geografische Lage der untersuchten Gebäudestandorte ist Abbildung 39 zu entnehmen.

Wien			Varna			Sofia			Izmir														
mit WDVS	ohne WDVS		mit WDVS	ohne WDVS		mit WDVS	ohne WDVS		mit WDVS	ohne WDVS													
Wien_mD_1	Wien_mD_2	Wien_mD_3	Wien_oD_1	Wien_oD_2	Wien_oD_3	Varna_mD_1	Varna_mD_2	Varna_mD_3	Varna_oD_1	Varna_oD_2	Varna_oD_3	Sofia_mD_1	Sofia_mD_2	Sofia_mD_3	Sofia_oD_1	Sofia_oD_2	Sofia_oD_3	Izmir_mD_1	Izmir_mD_2	Izmir_mD_3	Izmir_oD_1	Izmir_oD_2	Izmir_oD_3

Abbildung 38: Variantenkombinationen für die Gebäudesimulation

(Gebäudestandort_mD/oD_1 = Grundkombination

Gebäudestandort_mD/oD_2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Gebäudestandort_mD/oD_3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fensterflächen)



Abbildung 39: geografische Lage der untersuchten Gebäudestandorte [STE10]

Im Folgenden wird das verwendete Gebäudesimulationsprogramm kurz vorgestellt.

6.2.1. Simulationsprogramm Buildopt

Die Gebäudesimulationssoftware Buildopt wurde am Institut für Hochbau und Technologie (Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz) der TU Wien entwickelt. Es eignet sich zur Simulation der thermischen und hygrischen Vorgänge in einem Raumverbund. Im Gegensatz zu dem für die Versuchsnachbildung verwendeten Programm HAM3D, können mit Buildopt dynamische Simulationen von ganzen Gebäuden durchgeführt werden.

Das zu berechnende Gebäude wird durch ein Mehrzonenmodell nachgebildet. Um die Geometrie der einzelnen Zonen (Räume) festlegen zu können, werden den Eckpunkten der Räume Koordinaten zugewiesen. Über diese Koordinaten werden anschließend die Umschließungsflächen der Zonen definiert.

Die Eigenschaften dieser Zonengrenzen können über die Eingabe von Bauteilaufbauten verändert werden. Dazu werden physikalische Parameter wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Absorptionsgrad, Emissionsgrad, usw. der verwendeten Materialien festgelegt. Über die Eingabe der Schichtdicken der Materialien und der Reihenfolge der Schichten werden Aufbauten definiert, welche dann den Zonengrenzen zugewiesen werden. Liegen zwei Zonen im Drahtgittermodell nebeneinander (Nachbarzonen), so müssen sie an ihrer Berührungsfläche denselben Wandaufbau aufweisen.

Jeder Umschließungsfläche einer Zone können Fenster und Türen (frei wählbar in Größe und Position) zugewiesen werden. Die Eigenschaften von Fenstern und Türen werden in einer eigenen Datei definiert und können dort verändert werden.

Die Nutzung des Gebäudes kann über Eingabe der inneren Wärmequellen und des Luftwechsels nachgebildet werden.

Die äußeren Randbedingungen werden in einer Klimadatei festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Berechnungen für verschiedene Standorte durchgeführt. Um die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse abbilden zu können, werden sogenannte IWEC [ASH01] (International Weather for Energy Calculations) Datensätze verwendet. Nach der Festlegung aller Parameter für die Erstellung des virtuellen Gebäudes zeigt Buildopt eine grafische Darstellung des eingegebenen Mehrzonenmodells. Anhand dieser Darstellung lässt sich das Modell überprüfen bevor die Simulation gestartet wird.

Unter der Verwendung von Buildopt werden in dieser Arbeit die sich einstellenden, operativen Innentemperaturen eines Gebäudes an verschiedenen Standorten simuliert. Die Berücksichtigung einer Heiz- oder Kühlanlage ist dabei nicht vorgesehen.

Neben den für diese Arbeit relevanten thermischen Vorgängen kann mit Buildopt auch das hygrische Verhalten des Gebäudes simuliert werden. Da dies aber hier nicht von Interesse ist, bleibt diese Funktion ungenutzt.

6.2.2. Virtuelles Gebäude für die Simulation mit Buildopt

6.2.2.1. Gebäudegeometrie

Um die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse sicherzustellen wird eine Gebäudegeometrie festgelegt, welche für alle Simulationen beibehalten wird. Bei dem gewählten Gebäudemodell handelt es sich um ein zweigeschösiges Einfamilienhaus ohne Keller. Der Grundriss des Gebäudes ist in Abbildung 40 dargestellt. Abbildung 41 zeigt auf der linken Seite das für die Simulationen verwendete Drahtgittermodell und auf der rechten Seite eine Außenansicht des virtuellen Gebäudes.

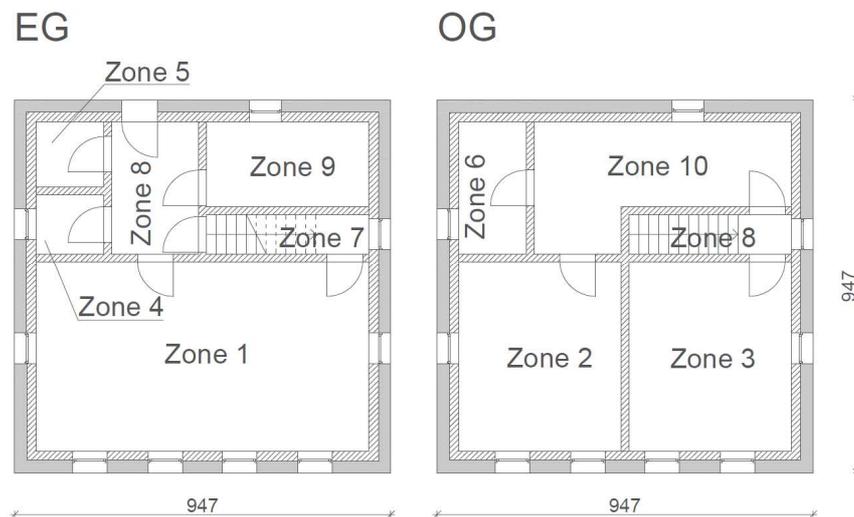


Abbildung 40: Grundriss des Einfamilienhauses (links: Erdgeschoß, rechts: Obergeschoß)

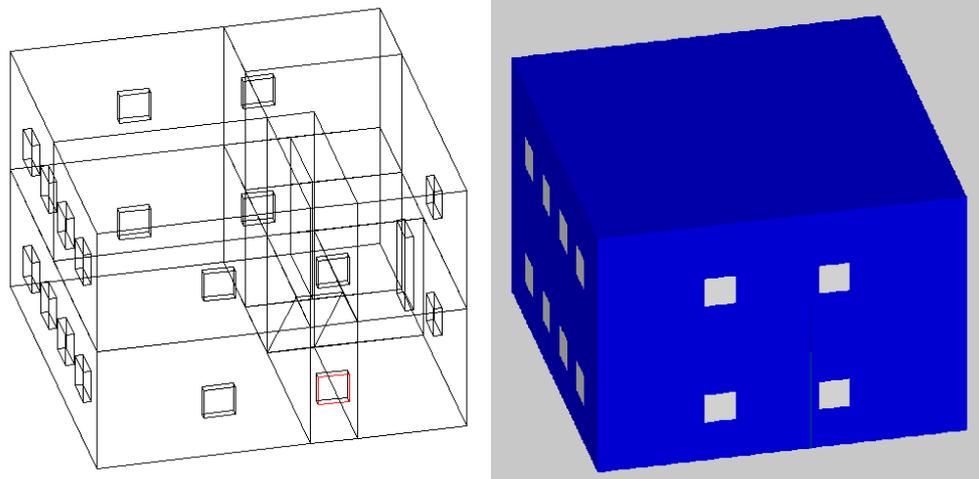


Abbildung 41: virtuelles Gebäude (links: Drahtgittermodell, rechts: fotorealistische Darstellung)

6.2.2.2. Wandaufbauten

In den Tabellen 9 bis 19 sind die Materialien aufgelistet, die für die verschiedenen Bauteile im virtuellen Modell angenommen werden. Die einzelnen Materialkennwerte sind der ÖNORM V31 [ONV] entnommen. In den Abbildungen sind auch die jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile angegeben. Für die Simulationsvarianten mit WDVS werden an den Außenwänden und im Dachbereich 30 cm EPS F-Plus angenommen.

Tabelle 9: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Außenwand ohne WDVS

Außenwand ohne WDVS					
von außen nach innen	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.040		
Kalkzementputz	0.03	0.8	0.038	1800	1130
Hochlochziegel	0.25	0.27	0.926	850	1000
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
R			0.130		
		Σ R	1.152		
	U-Wert:	0.868	[W/m²K]		

Tabelle 10: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Außenwand mit WDVS

Außenwand mit WDVS					
von außen nach innen					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.040		
Silikatputz	0.005	0.8	0.006	1800	1000
EPS F-Plus	0.3	0.031	9.677	18	1450
Klebspachtel	0.025	0.8	0.031	1400	1000
Kalkzementputz	0.03	0.8	0.038	1800	1130
Hochlochziegel	0.25	0.27	0.926	850	1000
Kalkzementputz	0.03	0.8	0.038	1800	1130
R			0.130		
		Σ R	10.886		
	U-Wert:	0.092	[W/m²K]		

Tabelle 11: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Dach für Variante ohne WDVS

Dach Variante ohne WDVS					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.100		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
EPS	0.05	0.036	1.389	25	1450
Bitumenabd.	0.005	0.17	0.029	1050	1260
Kies	0.05	0.7	0.071	1800	1000
R			0.040		
		Σ R	1.748		
	U-Wert:	0.572	[W/m²K]		

Tabelle 12: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Dach für Variante mit WDVS

Dach Variante WDVS					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.100		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
PE-Folie	0.0004	0.33	0.001	920	2200
EPS F-Plus	0.3	0.031	9.677	18	1450
Bitumenabd.	0.005	0.17	0.029	1050	1260
Kies	0.05	0.7	0.071	1800	1000
R			0.040		
		Σ R	10.038		
	U-Wert:	0.100	[W/m²K]		

Tabelle 13: Materialkennwerte und Schichtaufbau - erdberührender Boden

erdberührender Boden					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.000		
Kies	0.3	0.7	0.429	1800	1000
XPS	0.1	0.04	2.500	30	1400
PE-Folie	0.0002	0.33	0.001	920	2200
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
Schüttung	0.05	0.7	0.071	1800	1000
TDP	0.03	0.044	0.682	11	1450
PE-Folie	0.0001	0.33	0.000	920	2200
Estrichbeton	0.05	1.33	0.038	2000	1080
Parkett	0.02	0.17	0.118	700	2500
R			0.170		
		Σ R	4.108		
	U-Wert:	0.243	[W/m²K]		

Tabelle 14: Materialkennwerte und Schichtaufbau - erdberührender Boden im Bereich der Zonen 4 und 5

erdberührender Boden (Zone 4, Zone 5)					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.000		
Kies	0.3	0.7	0.429	1800	1000
XPS	0.1	0.04	2.500	30	1400
PE-Folie	0.0002	0.33	0.001	920	2200
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
Schüttung	0.05	0.7	0.071	1800	1000
TDP	0.03	0.044	0.682	11	1450
PE-Folie	0.0001	0.33	0.000	920	2200
Estrichbeton	0.05	1.33	0.038	2000	1080
keramischer Belag	0.02	1.3	0.015	2000	1000
R			0.170		
		Σ R	4.006		
	U-Wert:	0.250	[W/m²K]		

Tabelle 15: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Zwischendecke

Zwischendecke					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.170		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
TDP	0.03	0.044	0.682	11	1450
Estrichbeton	0.05	1.33	0.038	2000	1080
Parkett	0.02	0.17	0.118	700	2500
R			0.170		
		Σ R	1.296		
	U-Wert:	0.772	[W/m²K]		

Tabelle 16: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Zwischendecke im Bereich der Zonen 4, 5 und 6

Zwischendecke (Zone 4, Zone 5, Zone 6)					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.100		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
TDP	0.03	0.044	0.682	11	1450
Estrichbeton	0.05	1.33	0.038	2000	1080
keramischer Belag	0.02	1.3	0.015	2000	1000
R			0.100		
		Σ R	1.054		
	U-Wert:	0.949	[W/m²K]		

Tabelle 17: Materialkennwerte und Schichtaufbau - massive Innenwand

massive Innenwand					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.130		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Hochlochziegel	0.17	0.27	0.630	850	1000
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
R			0.130		
		Σ R	0.927		
	U-Wert:	1.079	[W/m²K]		

Tabelle 18: Materialkennwerte und Schichtaufbau - leichte Innenwand

leichte Innenwand (Zone 2, Zone 3)					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.130		
Gipskarton	0.0125	0.27	0.046	800	1200
MW-W	0.08	0.038	2.105	33	1030
Gipskarton	0.0125	0.27	0.046	800	1200
R			0.130		
		Σ R	2.458		
	U-Wert:	0.407	[W/m²K]		

Tabelle 19: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Stiege

Stiege					
von unten nach oben					
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
R			0.130		
Kalkzementputz	0.015	0.8	0.019	1800	1100
Stahlbeton	0.25	2.5	0.100	2400	1080
keramischer Belag	0.02	1.3	0.015	2000	1000
R			0.130		
		Σ R	0.394		
	U-Wert:	2.537	[W/m²K]		

6.2.2.3. Fensterqualität und Fenstergröße

Um den Einfluss der opaken Bauteile auf die Innentemperatur eines Gebäudes zu maximieren, wird auf große Fensterflächen in der Gebäudehülle verzichtet. Es werden lediglich die von der OIB Richtlinie 3 [OST07] geforderten 10% der Bodenfläche als Fensterfläche gewählt.

Die gewählten Fenster haben einen Wärmedurchgangskoeffizient U_w von 0,8 W/m²K. Der Wärmedurchgangskoeffizient im mittleren Scheibenbereich der Dreifachverglasung U_g beträgt 0,5 W/m²K. Der Strahlungstransmissionsgrad wird mit 0,36 angenommen. Der Energiedurchlassgrad (g-Wert) der Fenster beträgt 0,45. Es handelt sich somit um energetisch hochwertige Fenster, wie sie z.B. im Passivhausbereich verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter anderem der Einfluss von Verschattungsvorrichtungen auf die sommerlichen Raumtemperaturen untersucht. Dazu werden alle Simulationen einmal ohne Verschattung und einmal mit Verschattung durch Außenjalousien durchgeführt.

Die Verschattung von Fensterflächen wird mit dem Verschattungsfaktor z beschrieben. Laut ÖNORM B 8110-3 [ONO99] ist der Abminderungsfaktor z bei Verwendung von Außenjalousien mit 0,27 anzunehmen. Ist keine Verschattungsvorrichtung vorhanden bzw. wird diese nicht benutzt, ist der Verschattungsfaktor mit 1,0 anzusetzen.

In den Simulationen wird der Sonnenschutz aktiviert, sobald die Raumtemperatur 22 °C überschreitet.

Auch die Möglichkeit der nächtlichen Dauerlüftung über die Fenster wird in den Simulationen berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Fenster vollständig

geöffnet sind und einen Luftaustausch von 300 m³/h zulassen. Der Luftwechsel über die Fenster wird angesetzt, sobald die Außentemperatur um 1 Kelvin niedriger ist als die Raumtemperatur.

Anmerkung:

Sowohl die Benutzung der Jalousien, als auch das nächtliche Dauerlüften sind normalerweise von der Windgeschwindigkeit abhängig. Ist diese zu groß, wird der Sonnenschutz nicht aktiviert bzw. die Fenster nicht geöffnet. Da die Windgeschwindigkeit vor allem am Simulationsstandort Izmir während des Sommers sehr groß ist, würde hier der Sonnenschutz meist ungenützt und die Fenster meist geschlossen bleiben. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse an den verschiedenen Simulationsstandorten zu bewahren, wird die Windabhängigkeit nicht berücksichtigt.

6.2.2.4. Nutzung des Gebäudes

Das virtuelle Gebäude ist ein Einfamilienhaus und unterliegt somit einer Nutzung als Wohnraum. Für das Einfamilienhaus werden die in Tabelle 20 angeführten inneren Lasten angesetzt. Die inneren Lasten setzen sich aus dem Wärmeeintrag durch Geräte und dem Wärmeeintrag durch anwesende Personen zusammen. In der Tabelle ist auch der daraus resultierende hygienische Luftvolumenstrom angegeben. Die Tabelle entstammt einem Vorschlag für die neue ÖNORM B 8110-3 [ONO10a].

Tabelle 20: Innere Lasten und Luftwechsel aus der Nutzung des Gebäudes [ONO10a]

Wohnung				
Tageszeit		Geräte	Personen	
von	bis	spez. Wärmeleistung	spez. Wärmeleistung	hyg. Luftvolumenstrom
[h]	[h]	[W/m ²]	[W/m ²]	[m ³ /m ² h]
00:00:00	01:00:00	6.48	4.263	1.6
01:00:00	02:00:00	6.48	4.263	1.6
02:00:00	03:00:00	6.48	4.263	1.6
03:00:00	04:00:00	6.48	4.263	1.6
04:00:00	05:00:00	6.48	4.263	1.6
05:00:00	06:00:00	6.48	4.263	1.6
06:00:00	07:00:00	6.48	4.263	1.6
07:00:00	08:00:00	3.285	2.842	0.811
08:00:00	09:00:00	3.285	2.842	0.811
09:00:00	10:00:00	3.06	1.421	0.756
10:00:00	11:00:00	2.845	1.421	1.056
11:00:00	12:00:00	3.844	1.421	1.3
12:00:00	13:00:00	5.49	1.421	1.356
13:00:00	14:00:00	2.16	1.421	0.533
14:00:00	15:00:00	4.429	1.421	1.444
15:00:00	16:00:00	3.079	1.421	1.111
16:00:00	17:00:00	4.14	1.421	1.022
17:00:00	18:00:00	0.45	1.421	0.111
18:00:00	19:00:00	2.7	2.842	0.667
19:00:00	20:00:00	2.7	2.842	0.667
20:00:00	21:00:00	2.7	5.684	0.667
21:00:00	22:00:00	2.34	5.684	0.578
22:00:00	23:00:00	3.87	5.684	0.956
23:00:00	00:00:00	6.48	4.263	1.6

6.2.3. Klimatische Bedingungen an Simulationsstandorten

Ob die gewonnen Erkenntnisse auch für verschiedene klimatische Bedingungen zutreffend sind, soll durch dynamische Gebäudesimulationen an unterschiedlichen Standorten herausgefunden werden. Gerade für die Thematik der sommerlichen Überwärmung sind Regionen mit ausgeprägten Hitzeperioden von Interesse. Aus diesem Grund werden neben Wien auch die beiden bulgarischen Städte Sofia und Varna, sowie die türkische Stadt Izmir als Gebäudestandorte für die Simulation gewählt. Die Abbildungen 42 bis 45 zeigen jeweils die in den IWEC [ASH01]

Wetterdatensätzen verwendeten Werte für die Globalstrahlung [W/m^2] und die Außenlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$].

Durch einen Vergleich der Diagramme lässt sich feststellen, dass in Wien, gefolgt von Sofia und Varna, das gemäßigtere Klima herrscht. In Izmir sind sowohl die Strahlungsintensität, als auch die Außenlufttemperatur bei weitem am höchsten.

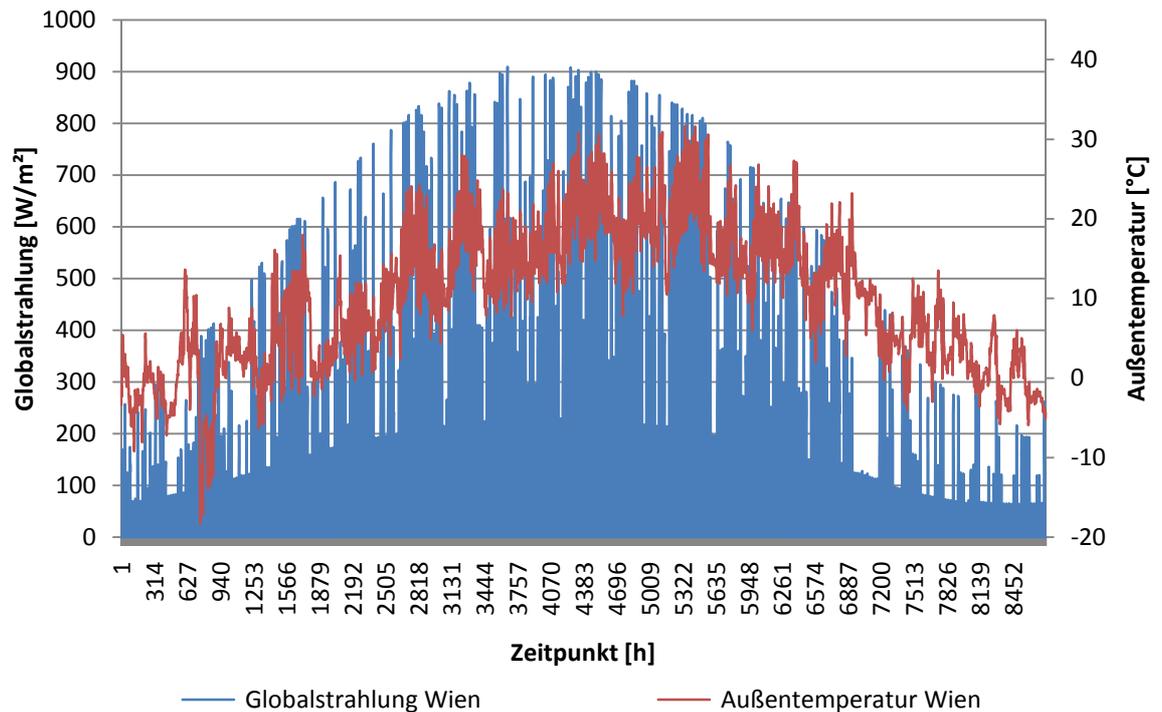


Abbildung 42: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Wien aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres

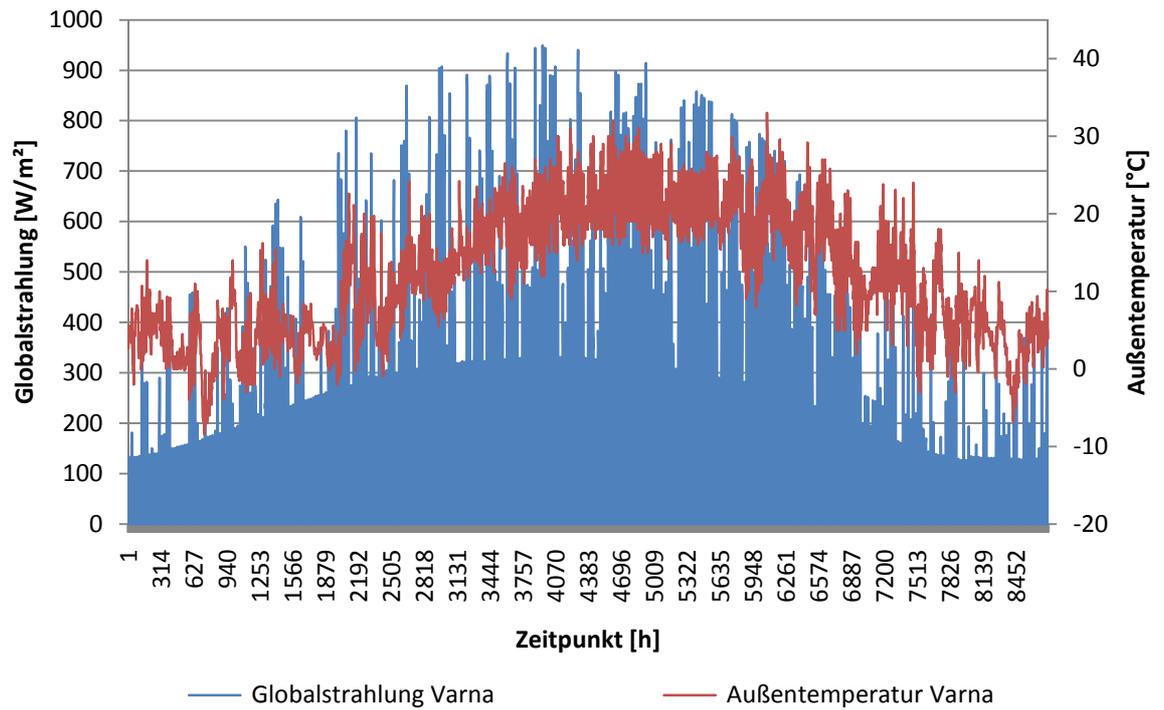


Abbildung 43: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Varna aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres

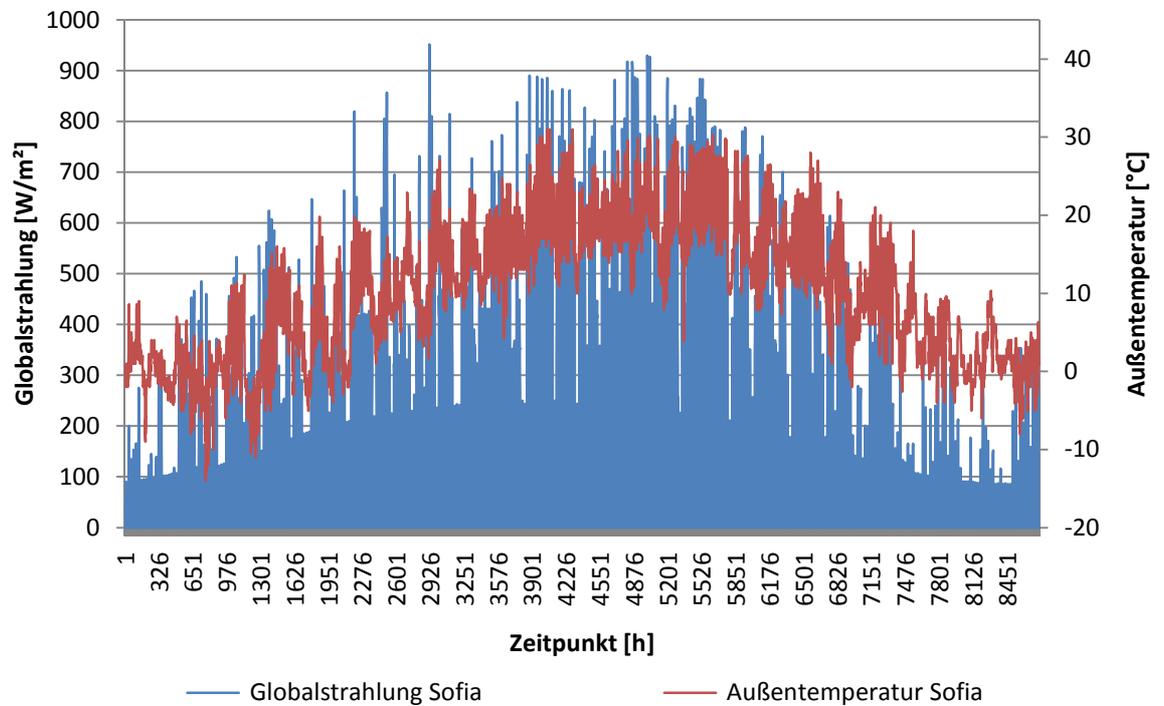


Abbildung 44: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Sofia aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres

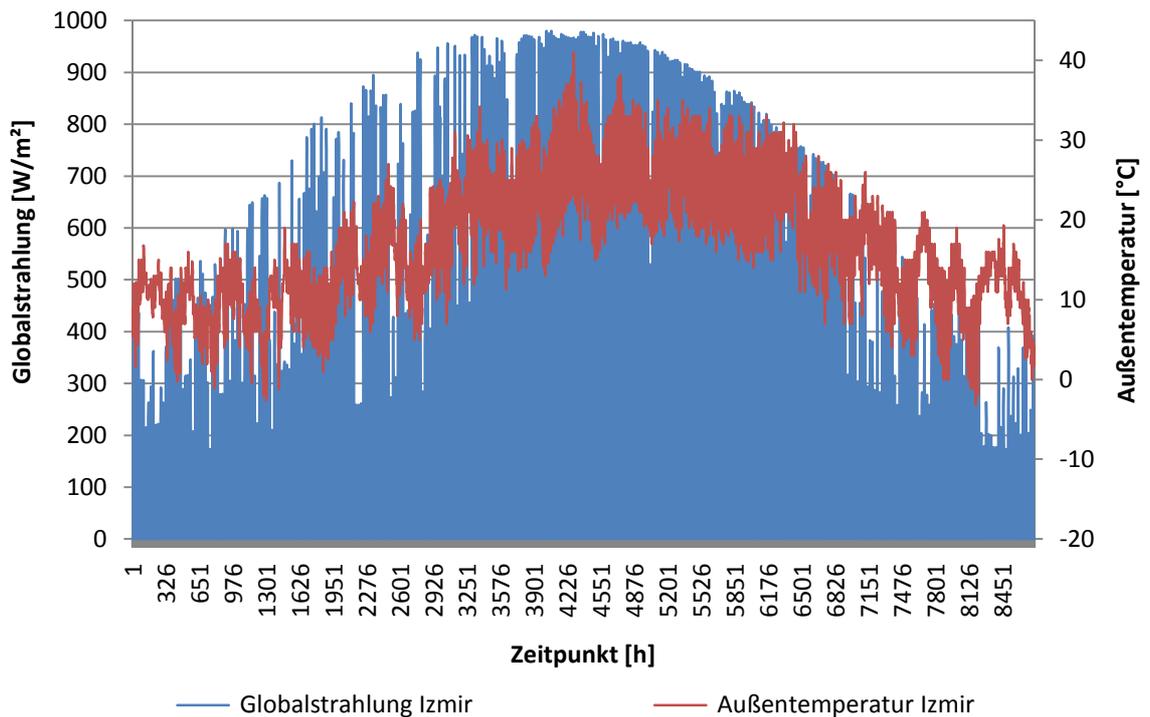


Abbildung 45: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Izmir aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres

6.2.4. Analyse der maximalen operativen Raumtemperaturen

Mit den durchgeführten Gebäudesimulationen werden für alle Variantenkombinationen die Raumtemperaturen eines gesamten Jahres berechnet.

Die Zone 2 des Gebäudemodells weist bei allen Variantenkombinationen die höchsten Raumtemperaturen auf. Sie liegt im Obergeschoß, ist südwestlich orientiert und hat ein netto Raumvolumen von 66,53 m³. Da die Zone 2 für die sommerliche Überwärmung die kritischste Zone darstellt, wird im Folgenden ausschließlich diese Zone untersucht.

In Abbildung 46 sind die in Zone 2 maximal auftretenden operativen Raumtemperaturen aller Simulationsvarianten dargestellt. Aus der Abbildung lässt sich sowohl der Einfluss der Wärmedämmung, als auch die Wirksamkeit des nächtlichen Dauerlüftens und der Verschattung von Fensterflächen erkennen.

Durch den Vergleich der Varianten „Var 1“ und „Var 2“ kann man an allen Gebäudestandorten erkennen, dass die maximale Raumtemperatur durch nächtlichen Fensterluftwechsel um mehrere Kelvin gesenkt werden kann. Im Gegensatz dazu zeigen Verschattungsmaßnahmen der Fenster nur geringe Wirkung.

In Wien, Varna und Sofia liegt die maximale Raumtemperatur ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen („Var 1“) bei den Varianten ohne WDVS (roter Balken) tiefer als bei den Varianten mit WDVS (blauer Balken). Sobald in der Simulation jedoch die nächtliche Dauerlüftung über die Fenster berücksichtigt wird, liegen die maximalen operativen Raumtemperaturen in den gedämmten Gebäuden tiefer.

Am Gebäudestandort Izmir stellt sich dieser Zustand schon bei der Grundvariante ein. Die maximale Raumtemperatur ohne WDVS liegt knapp über der mit WDVS. Durch konsequente Lüftungsmaßnahmen kann die maximale Raumtemperatur in Izmir um rund vier Kelvin reduziert werden. Der Einfluss der Verschattungsvorrichtungen ist auch hier sehr gering.

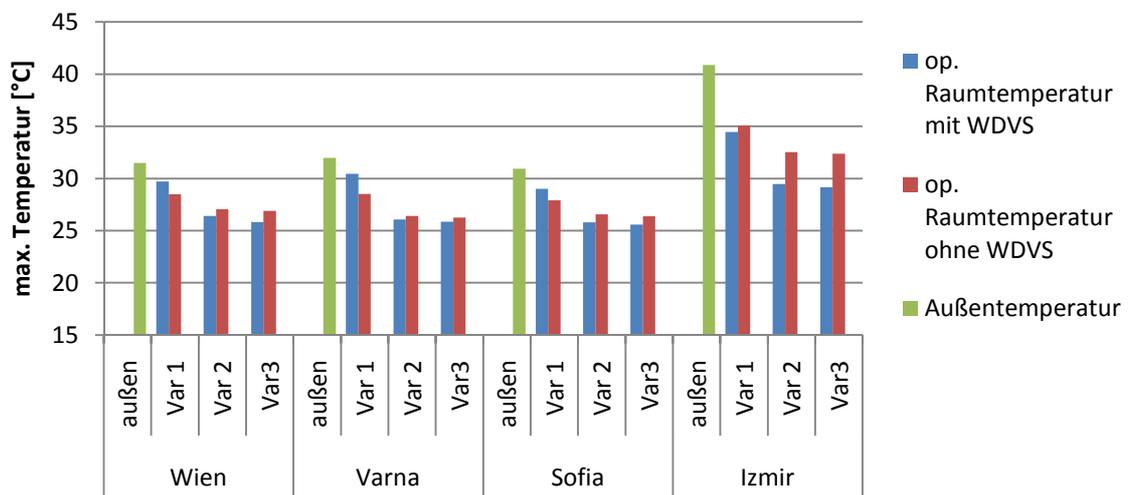


Abbildung 46: Vergleich der maximalen Außentemperaturen und der maximalen operativen Raumtemperaturen aller Varianten

(Var1 = Grundkombination

Var2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Var3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fensterflächen)

Zumindest zum Zeitpunkt der maximalen Raumüberwärmung innerhalb eines Jahres ist ein Außenwandquerschnitt mit Wärmedämmung in der Lage die Temperaturspitzen abzuschwächen und somit für ein angenehmeres Raumklima zu sorgen. Voraussetzung dafür ist jedoch die konsequente nächtliche Dauerbelüftung der Räume über die Fenster.

Es ist zu beachten, dass es sich bei der Analyse der maximal auftretenden Raumtemperaturen um eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der maximalen Überwärmung einer Zone handelt. Wie sich das Gebäude zu allen anderen

Zeitpunkten verhält, kann nicht beurteilt werden. Um eine eindeutige Aussage treffen zu können, müssen die Raumtemperaturen über einen längeren Zeitraum betrachtet werden.

6.2.5. Analyse der durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen während der Sommermonate

Im Folgenden werden die durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen während der Sommermonate untersucht. Die in Abbildung 47 dargestellten Raumtemperaturen stellen einen Mittelwert über den Zeitraum von 1.7. 2010 bis 31.8.2010 dar, wobei die Jahreszahl unerheblich ist. Dieser Zeitraum ist für die sommerliche Überwärmung der in dieser Arbeit analysierten Gebäude maßgeblich.

Wie Abbildung 47 zeigt, liegen die durchschnittlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden mit WDVS höher als bei Gebäuden ohne WDVS. Einzige Ausnahme stellt der Gebäudestandort Izmir dar. In Izmir fallen die durchschnittlichen Raumtemperaturen mit WDVS unter die durchschnittlichen Raumtemperaturen ohne WDVS. Voraussetzung ist jedoch die Berücksichtigung von nächtlichem Dauerlüften über die Fenster.

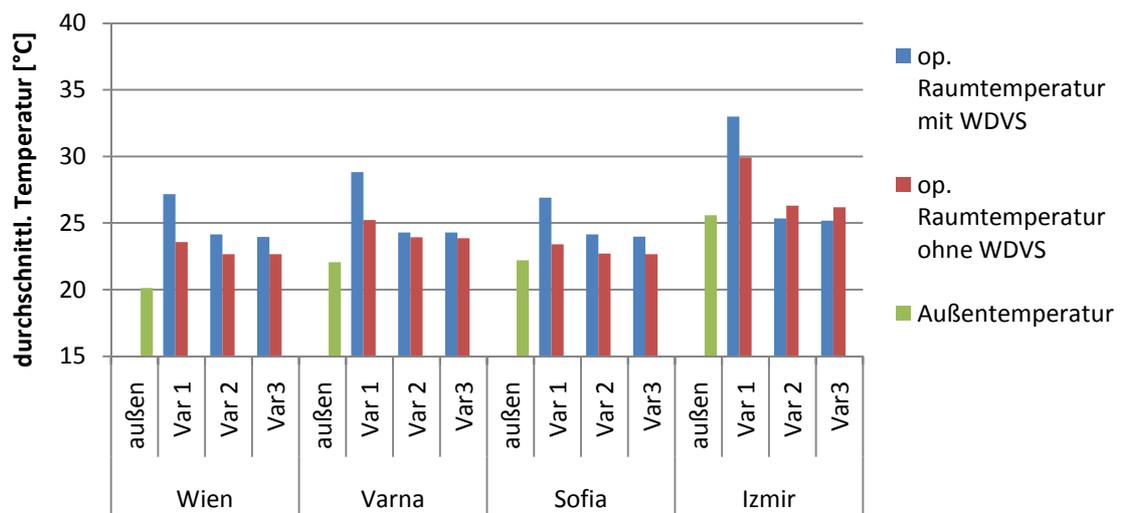


Abbildung 47: Vergleich der durchschnittlichen Außentemperaturen und der durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen aller Varianten über den Zeitraum von 1.7. bis 31.8.

(Var1 = Grundkombination

Var2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Var3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fensterflächen)

6.2.6. Analyse des zeitlichen Verlaufs der operativen Raumtemperaturen

Für die Analyse des zeitlichen Verlaufs der operativen Raumtemperaturen wird wie oben der Zeitraum von 1.7. bis 31.8. betrachtet.

In den Abbildungen 48 bis 59 sind die Verläufe der operativen Raumtemperaturen in der Zone 2 des Gebäudemodells dargestellt. Um den Einfluss der Wärmedämmung feststellen zu können, wird in den Abbildungen jeweils das Simulationsergebnis mit WDVS mit dem Simulationsergebnis ohne WDVS verglichen. Ein Richtwert (27 °C) für das Eintreten sommerlicher Überwärmung ist in den Abbildungen rot dargestellt. Es handelt sich dabei lediglich um eine Orientierungshilfe und nicht um ein Nachweiskriterium der ÖNORM B 8110-3. Der Nachweis laut Norm ist für eine Außentemperatur zu führen, die im langjährigen Mittel an nicht mehr als 13 Tagen überschritten wird. Eine Überschreitung der Grenztemperatur in den Abbildungen bedeutet somit nicht automatisch, dass der Nachweis der Vermeidung der sommerlichen Überwärmung nicht erbracht werden kann. Der Nachweis laut ÖNORM B 8110-3 [ONO99] ist außerdem ausschließlich für die geografische Lage Österreichs gültig. Da die Außentemperaturen vor allem am Standort Izmir teilweise erheblich über denen in Wien liegen, wird auch die Temperatur von 27 °C wesentlich öfter überschritten.

Die Abbildungen 48, 51, 54 und 57 zeigen die Raumtemperaturverläufe der Grundkombination an den vier verschiedenen Gebäudestandorten. Durch die Berücksichtigung von nächtlichem Dauerluftwechsel entstehen die in den Abbildungen 49, 52, 55 und 58 gezeigten Verläufe. Werden an warmen Tagen zusätzlich die Fensterflächen verschattet, ergeben sich die in den Abbildungen 50, 53, 56 und 59 dargestellten Temperaturverläufe.

Gebäudestandort Wien

Die zeitlichen Verläufe der operativen Raumtemperaturen in der Zone 2 des Gebäudemodells am Standort Wien sind in den Abbildungen 48 bis 50 dargestellt.

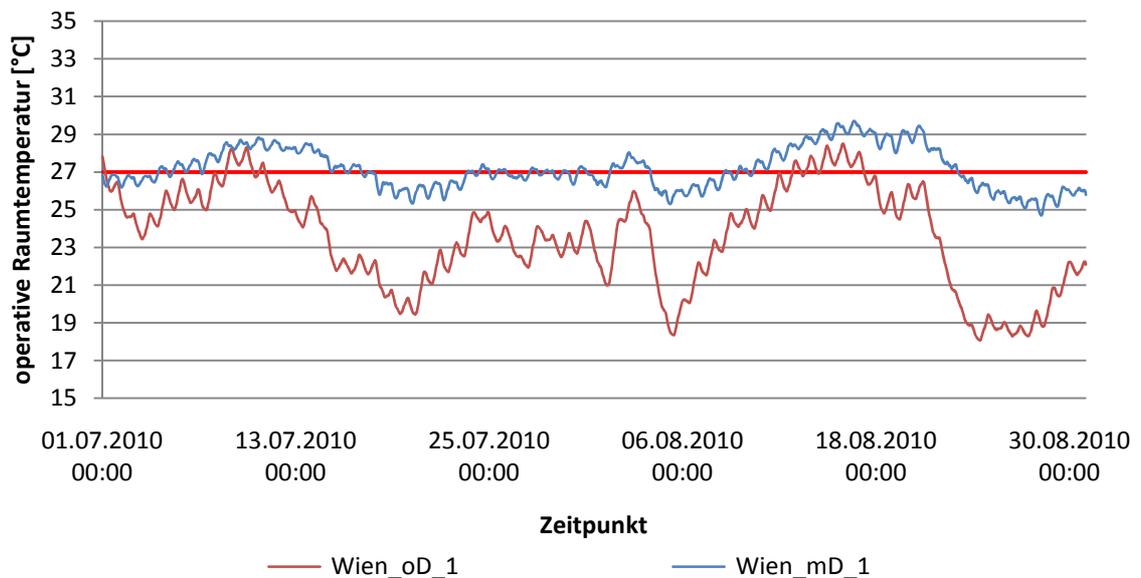


Abbildung 48: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

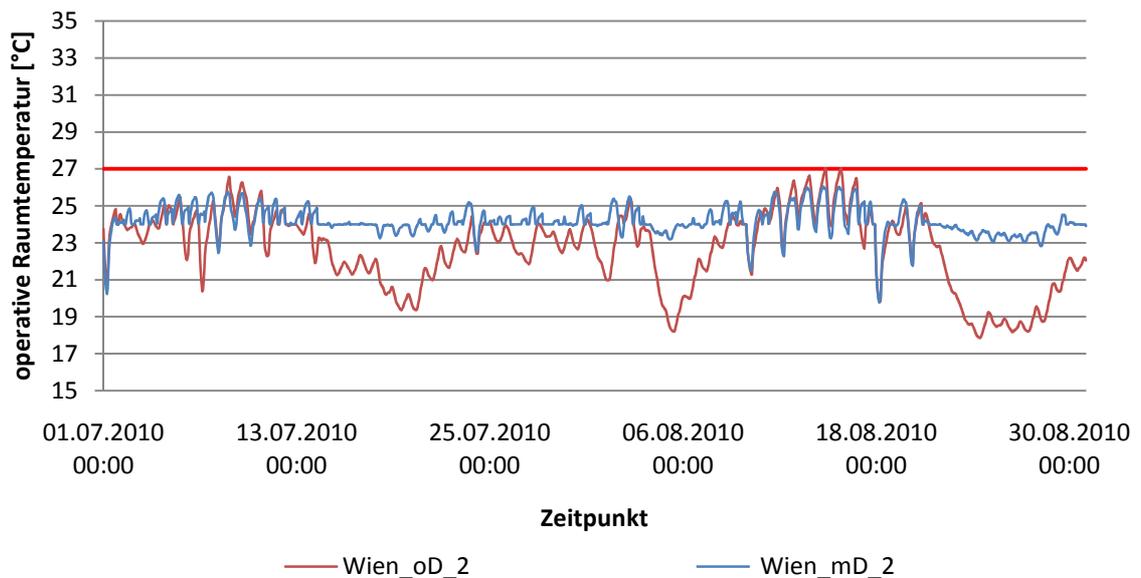


Abbildung 49: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

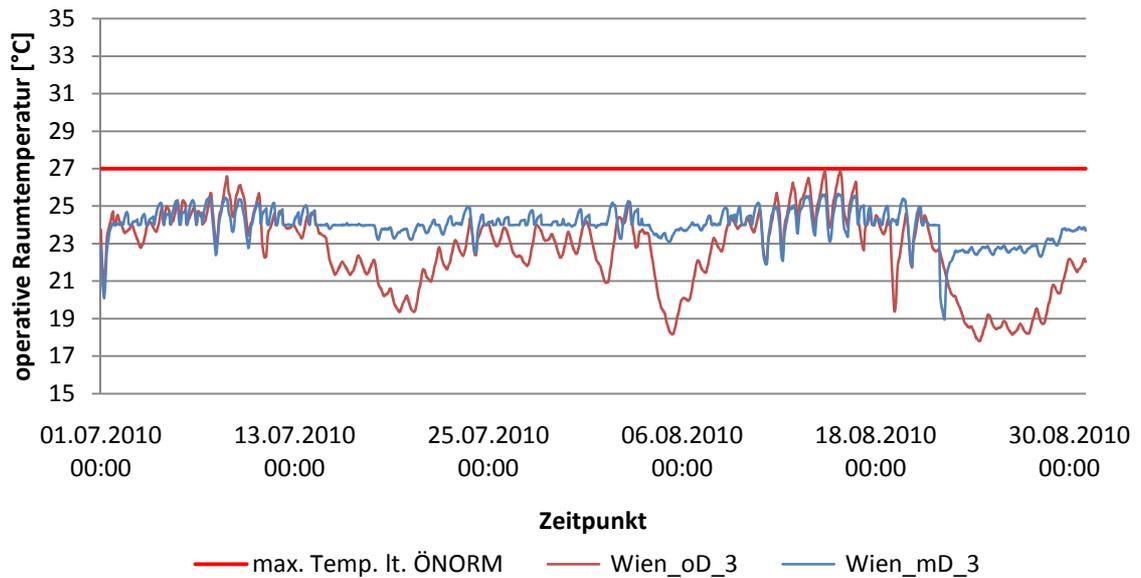


Abbildung 50: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

Gebäudestandort Varna

Die zeitlichen Verläufe der operativen Raumtemperaturen in der Zone 2 des Gebäudemodells am Standort Varna sind in den Abbildungen 51 bis 53 dargestellt.

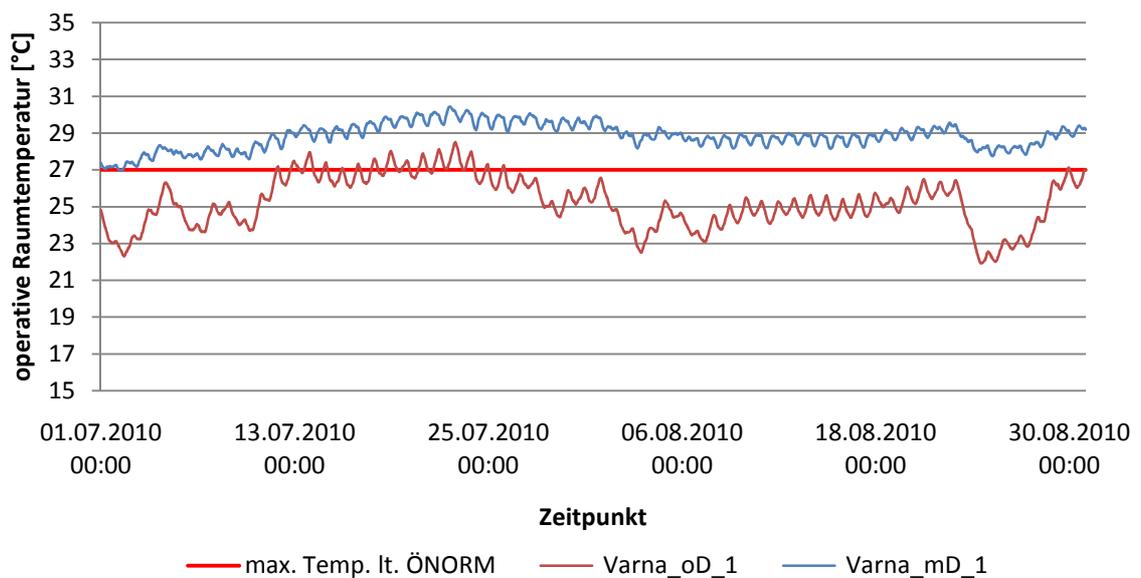


Abbildung 51: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

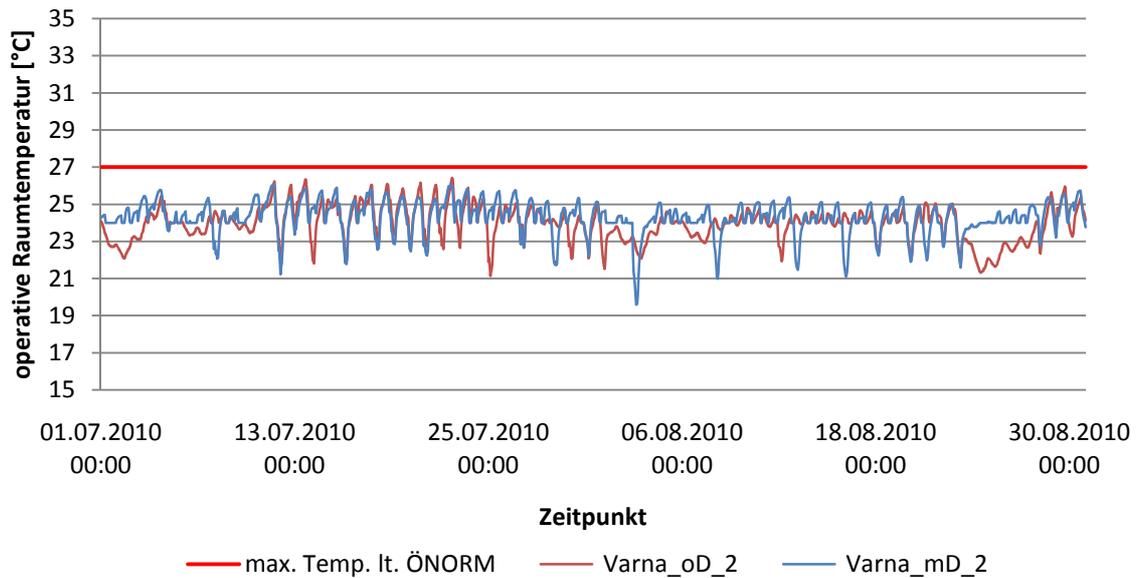


Abbildung 52: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

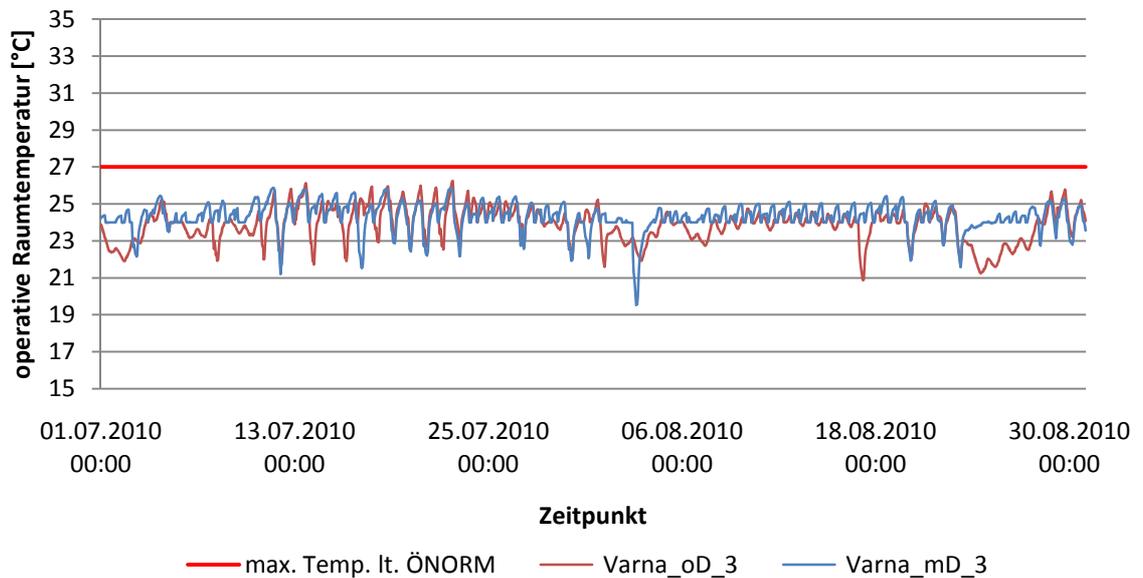


Abbildung 53: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

Gebäudestandort Sofia

Die zeitlichen Verläufe der operativen Raumtemperaturen in der Zone 2 des Gebäudemodells am Standort Sofia sind in den Abbildungen 54 bis 56 dargestellt.

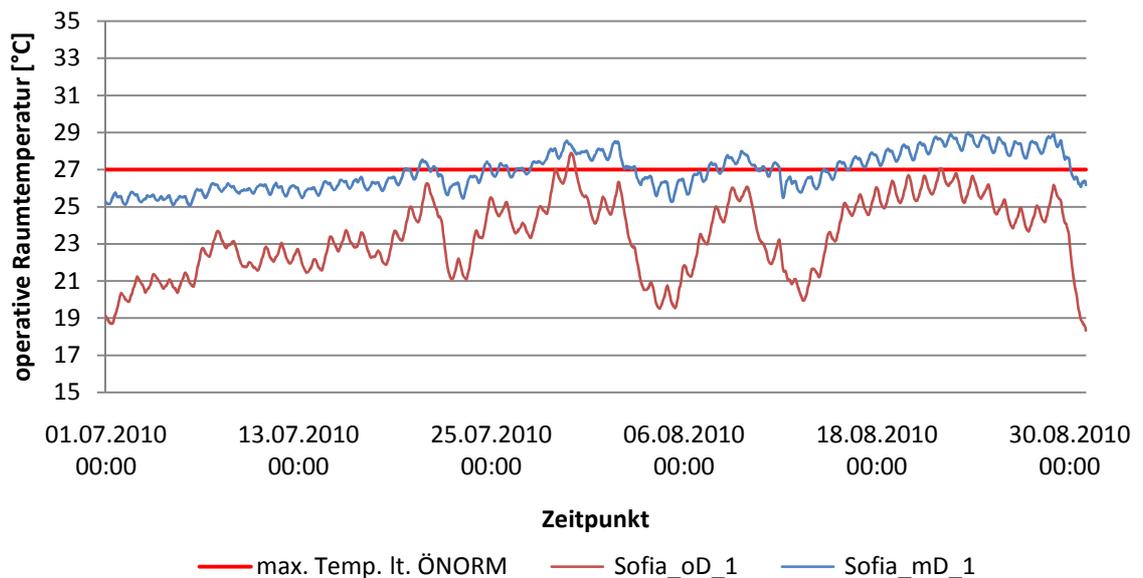


Abbildung 54: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

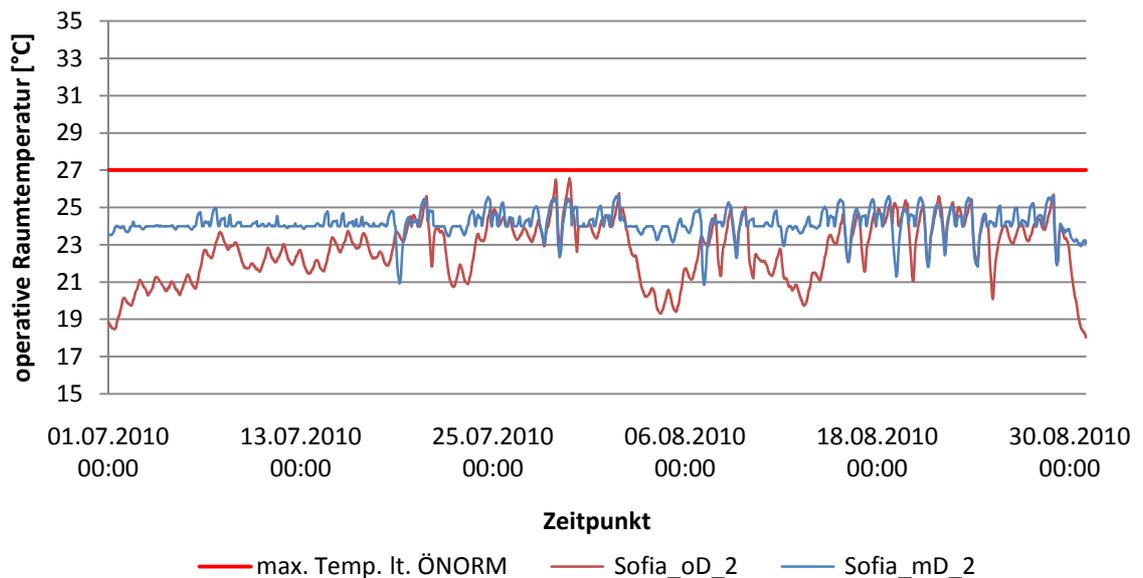


Abbildung 55: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

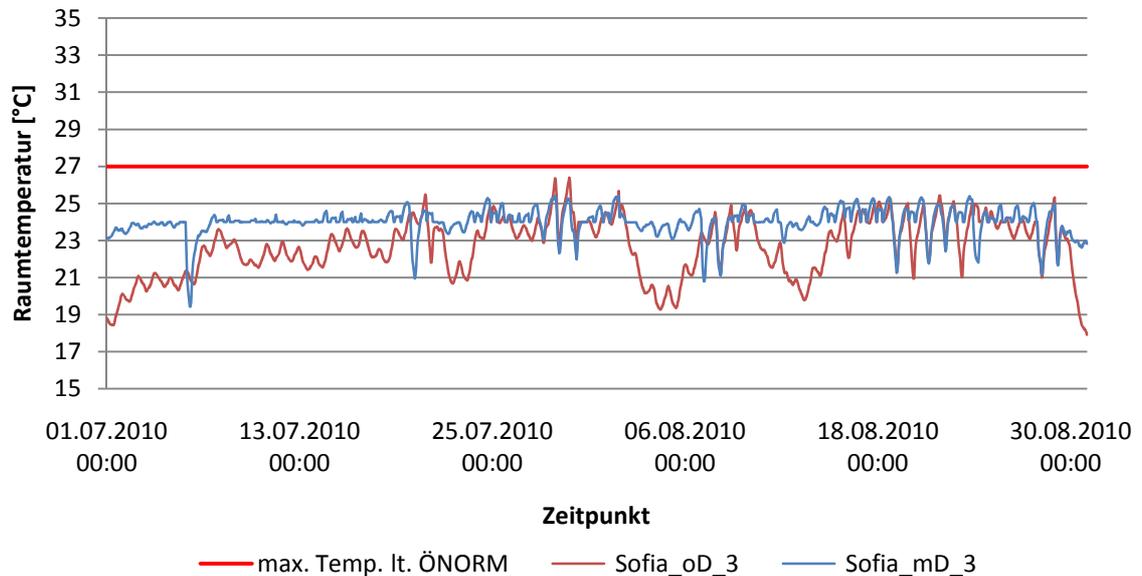


Abbildung 56: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

Gebäudestandort Izmir

Die zeitlichen Verläufe der operativen Raumtemperaturen in der Zone 2 des Gebäudemodells am Standort Izmir sind in den Abbildungen 57 bis 59 dargestellt.

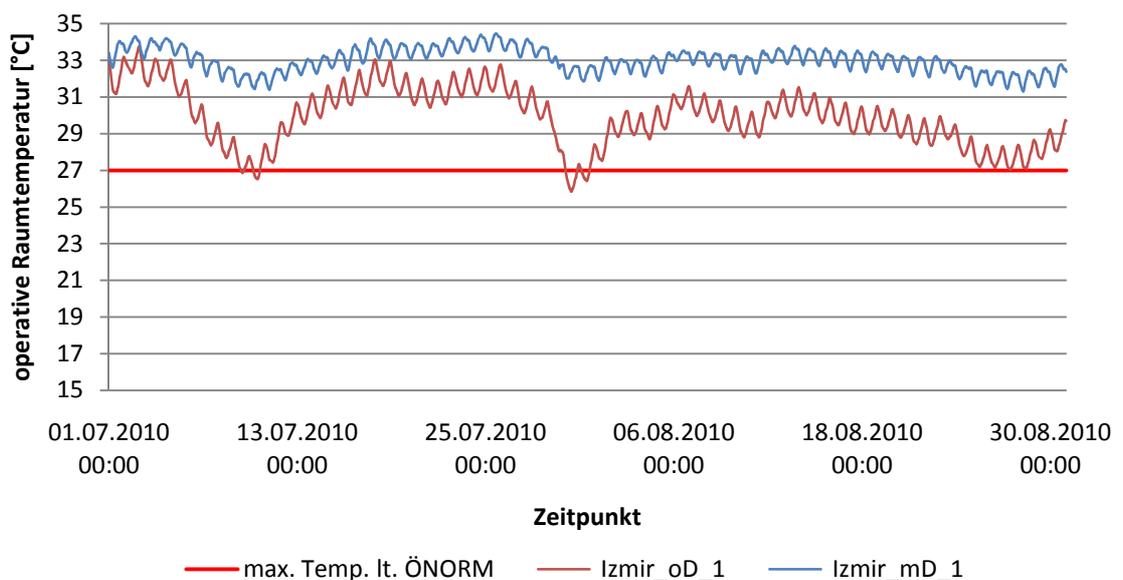


Abbildung 57: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

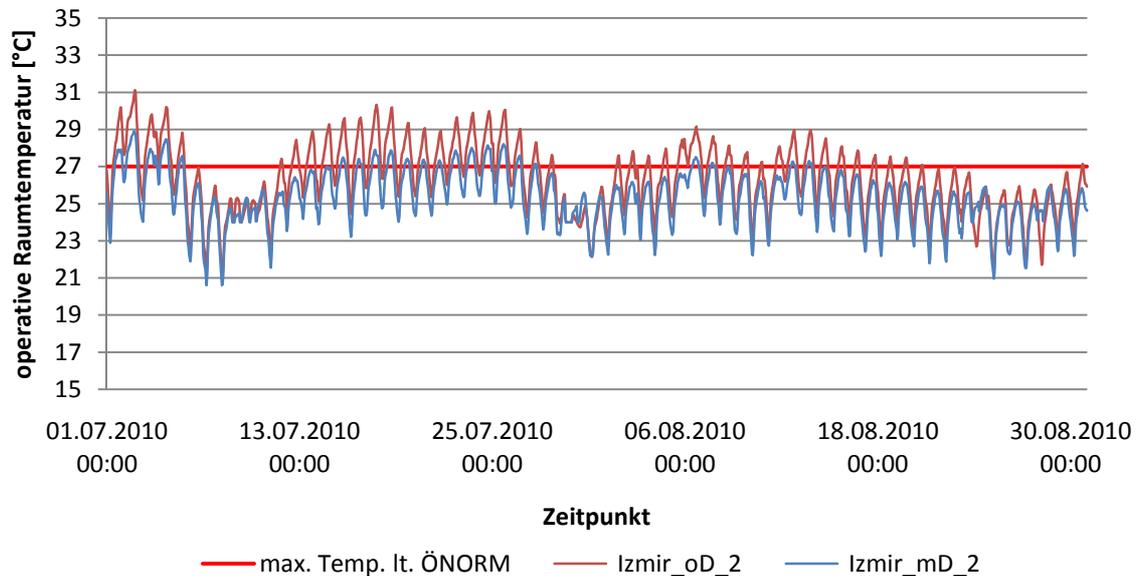


Abbildung 58: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

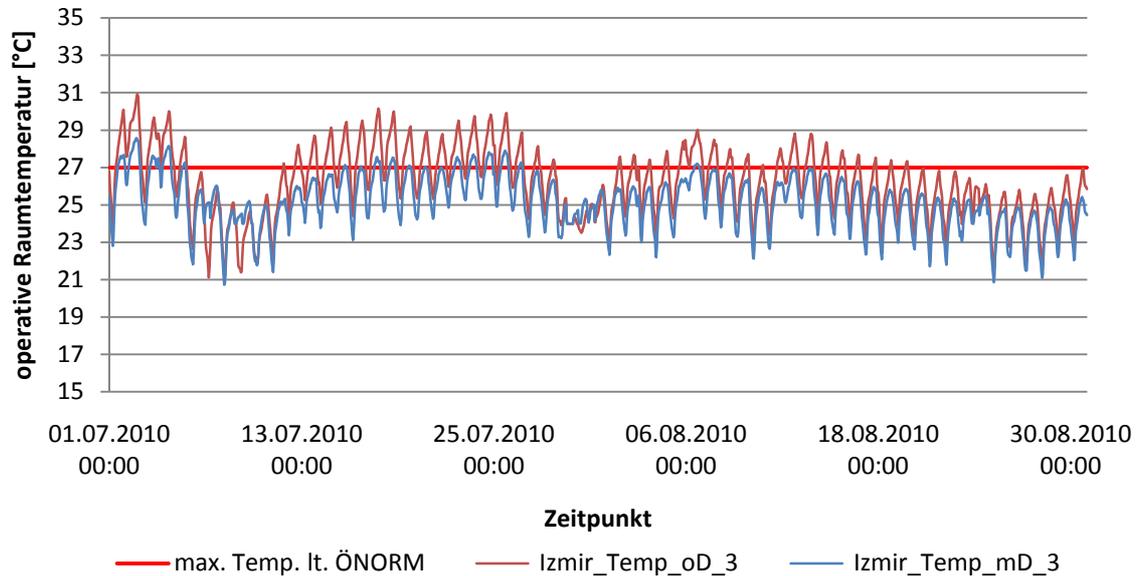


Abbildung 59: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie)

Aus den Abbildungen 48, 51, 54 und 57 kann man erkennen, dass die operativen Raumtemperaturen im Sommer bei Verwendung eines WDVS konstant höher liegen als für Gebäude ohne WDVS. Während Hitzeperioden stellt sich die minimale

Temperaturdifferenz ein. Die durchschnittliche Raumtemperatur liegt jedoch bei der Verwendung eines WDVS um einige Kelvin höher als ohne WDVS.

Werden die Fenster weder in der Nacht geöffnet, noch unter Tags verschattet, verhindert das WDVS den Abtransport von Wärme über die opaken Bauteile. Die Eigenschaft des WDVS den Wärmetransport zu reduzieren macht sich hier somit negativ bemerkbar. Die hohe angenommene Dämmschichtstärke von 30 cm verstärkt diesen Effekt. Da kein maßgeblicher Luftwechsel zwischen innen und außen stattfindet kann die niedrigere nächtliche Außenluft nicht zum Kühlen der Räume genutzt werden.

Durch die Berücksichtigung von nächtlichem Dauerluftwechsel über die Fenster (siehe Abbildungen 49, 52, 55 und 58 lassen sich die Raumtemperaturen an allen Gebäudestandorten maßgeblich reduzieren.

Während in Wien, Varna und Sofia lediglich die Temperaturspitzen durch das WDVS reduziert werden, die durchschnittliche Raumtemperatur jedoch weiter höher liegt als bei den Varianten ohne WDVS, stellen sich in Izmir durch die Verwendung von WDVS durchgehend niedrigere Raumtemperaturen ein. Die großen Außentemperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht in Izmir heben die Vorteile eines konsequenten Lüftungsverhaltens hervor. Die niedrige Außenlufttemperatur wird in der Nacht genutzt um die Räume abzukühlen. Sobald die Außentemperatur die Raumtemperatur überschreitet werden die Fenster geschlossen. Der hohe Wärmedurchgangswiderstand des WDVS hilft das kühle Innenraumklima unter Tags zu bewahren, indem der Wärmetransport durch die opaken Bauteile auf ein Minimum reduziert wird.

Durch die Berücksichtigung der Verschattung von Fensterflächen (Abbildungen 50, 53, 56 und 59) lässt sich an allen Gebäudestandorten eine Reduktion der operativen Raumtemperaturen feststellen. Die erreichte Absenkung der Temperaturen bewegt sich jedoch in einem äußerst kleinen Bereich.

Die geringe Wirkung der Verschattungsmaßnahmen lässt sich auf zwei Ursachen zurückführen. Der sehr kleine Fensterflächenanteil an der Fassade des virtuellen Gebäudes und der niedrige Energiedurchlassgrad der verbauten Fenster lassen dem Wärmeeintrag durch Strahlung über die Fenster auch ohne Verschattung keine maßgebliche Bedeutung zukommen. Wären die Fensterflächen größer und der Energiedurchlassgrad der Fenster höher, wäre der Einfluss der Fenster Verschattung bedeutsamer.

6.2.7. Häufigkeitsverteilung von auftretenden Raumtemperaturen

In den Abbildungen 60 bis 63 ist für die vier Gebäudestandorte die Dauer der Überschreitung von Grenztemperaturen dargestellt. Für die Grenztemperaturen 25 °C, 26 °C, 27 °C, 28 °C, 29 °C und 30 °C ist jeweils die Anzahl an Stunden abgebildet, an denen sie von den operativen Raumtemperaturen überschritten werden.

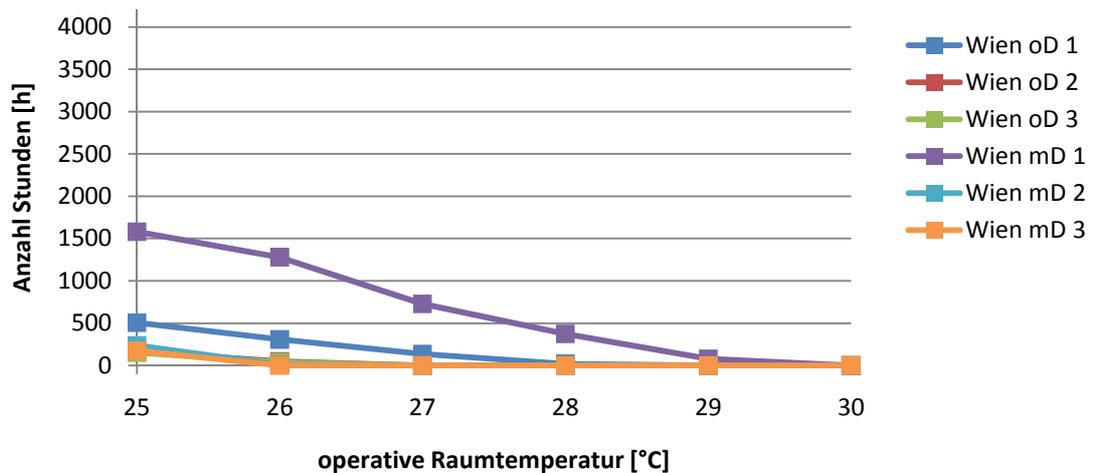


Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien

(Wien oD bzw. mD 1 = Grundkombination)

Wien oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Wien oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

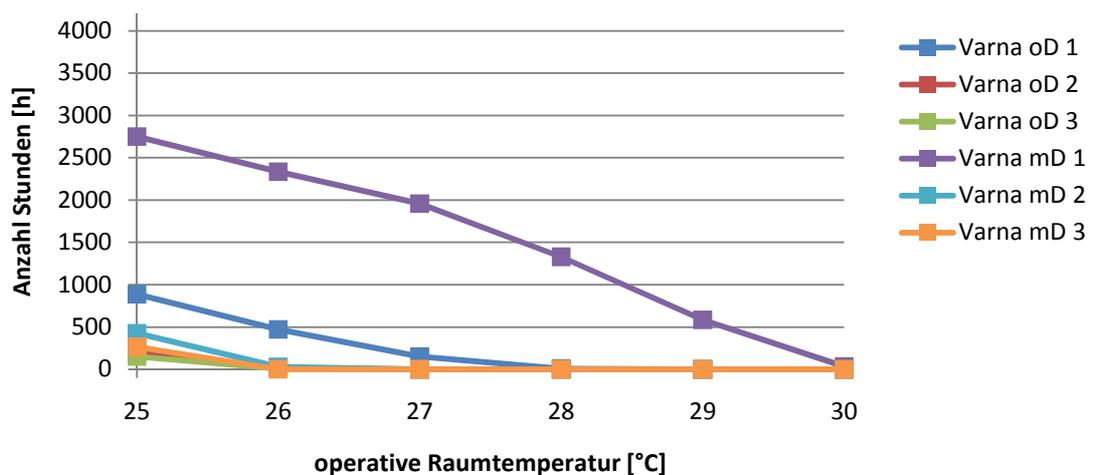


Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna

(Varna oD bzw. mD 1 = Grundkombination)

Varna oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Varna oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fensterflächen)

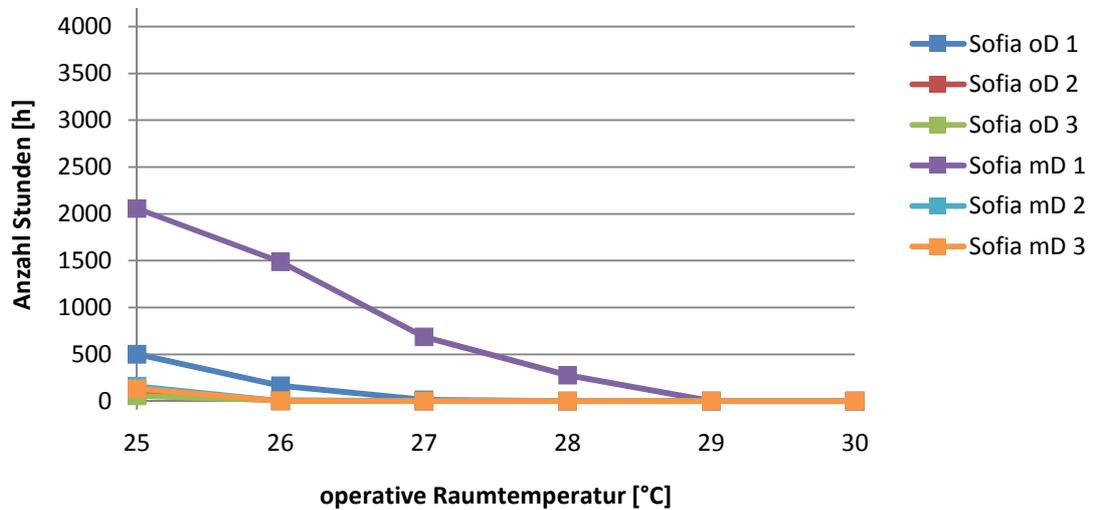


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia

(Sofia oD bzw. mD 1 = Grundkombination

Sofia oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Sofia oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

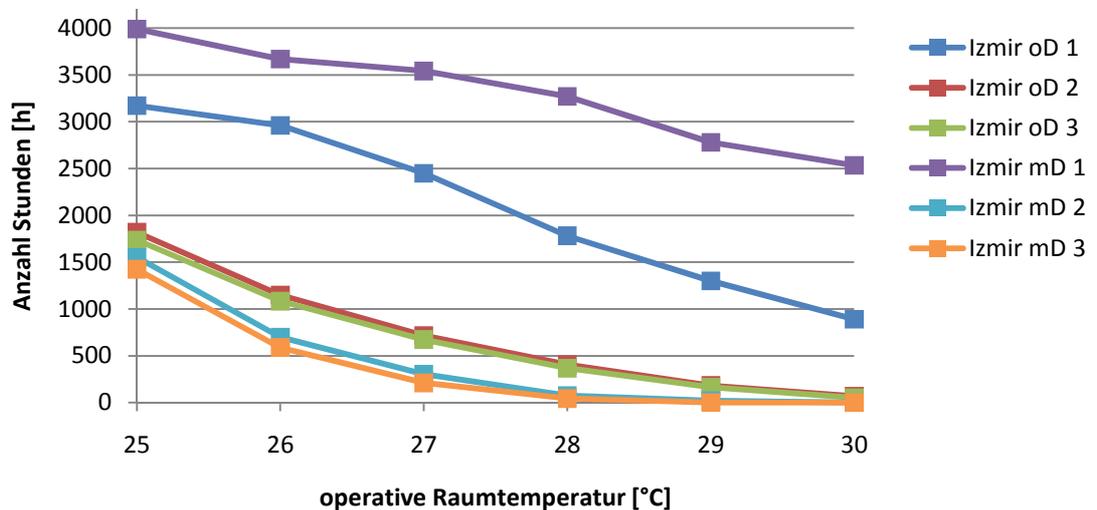


Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir

(Izmir oD bzw. mD 1 = Grundkombination

Izmir oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Izmir oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

Aus den Abbildungen 60 bis 63 kann man wie schon zuvor erkennen, dass die Grundkombination mit WDVS zu den höchsten Raumtemperaturen führt. Auch die

Anzahl der Stunden an denen eine gewisse Grenztemperatur überschritten wird, liegt bei der Grundkombination mit WDVS stets am höchsten.

Zu einer wesentlich geringeren Überschreitungsdauer kommt es an allen Gebäudestandorten bei der Grundkombination mit Außenwänden ohne WDVS.

Die Anzahl an Stunden an denen eine Grenztemperatur überschritten wird, kann weiter gesenkt werden, indem ein nächtlicher Fensterluftwechsel berücksichtigt wird. Während sich an den Standorten Wien, Varna und Sofia kaum relevante Unterschiede zwischen den Varianten mit WDVS und ohne WDVS aus den Diagrammen erkennen lassen, ist für den Gebäudestandort Izmir eine deutliche Senkung der Überschreitungsdauer durch die Verwendung von WDVS zu erkennen. Hier ist auch eine Verbesserung durch die Verschattung der Fensterflächen zu erkennen.

6.2.8. Klassifizierung nach ÖNORM EN 15251 [ONO07]

Die ÖNORM EN 15251 [ONO07] (siehe Kapitel 2.3.1.) stellt ein Verfahren zur Verfügung, anhand dessen sich Gebäude an verschiedenen klimatischen Standorten vergleichen lassen. In Abhängigkeit der am Gebäudestandort auftretenden Außentemperaturen und der sich dadurch einstellenden Innenraumtemperaturen, erfolgt eine Klassifizierung der untersuchten Gebäude.

Theoretisch kann für jeden beliebigen Zeitpunkt eines Jahres die Gebäudekategorie ermittelt werden. Für den Winter gibt die Norm eine Funktion für die minimal zulässige Raumtemperatur an. Für sommerliche Klimaverhältnisse ist die Begrenzung der Raumtemperaturen nach unten hin jedoch nicht maßgebend. Aus diesem Grund sind die unteren Grenztemperaturen in den Abbildungen 64 bis 67 nicht ausgewiesen. Die Diagramme in den Abbildungen beziehen sich jeweils auf den Zeitpunkt, an dem der Zusammenhang zwischen gleitendem Mittelwert der Außentemperatur und der auftretenden operativen Raumtemperatur am kritischsten ist.

Die Klassifizierung nach ÖNORM EN 15251 [ONO07] am Standort Wien (siehe Abbildung 64) zeigt, dass durch das Setzen von Raumtemperatur senkenden Maßnahmen für das untersuchte Gebäude die Kategorie 1 erreicht werden kann. Für die Grundkombination (d.h. ohne nächtlichem Dauerluftwechsel und ohne Verschattungsmaßnahmen) liegt bei den Varianten mit WDVS ein Gebäude der Kategorie 2 und bei den Varianten ohne WDVS ein Gebäude der Kategorie 3 vor.

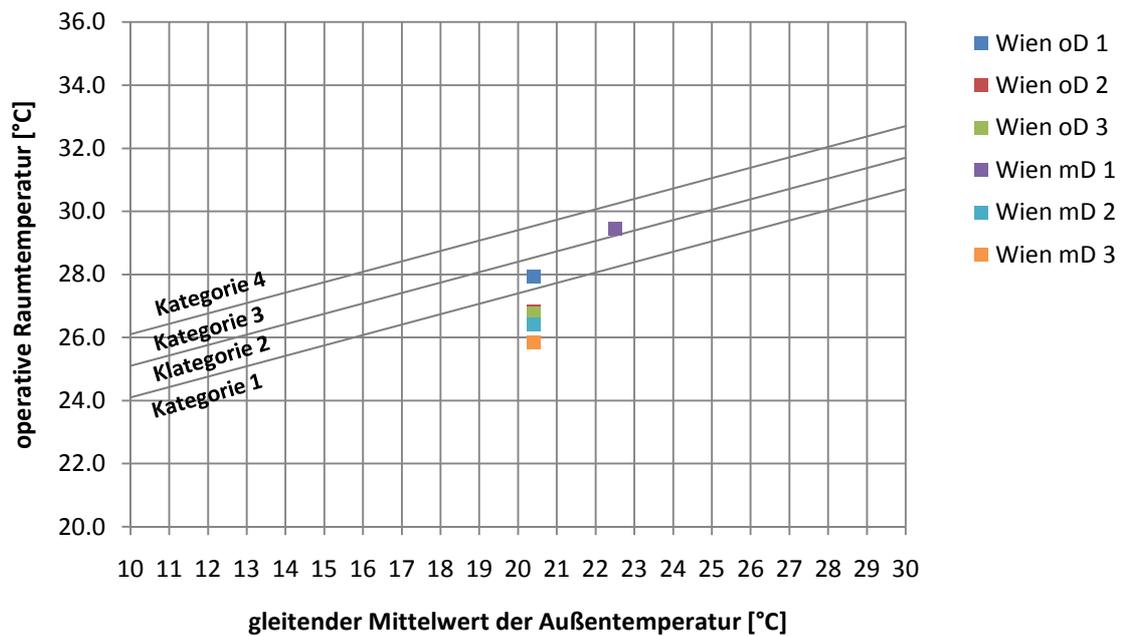


Abbildung 64: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Wien

(Wien oD bzw. mD 1 = Grundkombination)

Wien oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Wien oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

Abbildung 65 zeigt die Klassifizierung nach ÖNORM EN 15251 [ONO07] für den Gebäudestandort Varna. Ähnlich den Ergebnissen für den Standort Wien schneiden auch hier die Simulationsvarianten ohne nächtlichen Dauerluftwechsel und ohne Verschattung der Fensterflächen am schlechtesten ab. Die Variante mit WDVS ergibt hier ein Gebäude an der Grenze zwischen Kategorie 3 und 4. Das Gebäude ohne WDVS liegt an der Grenze zwischen Kategorie 1 und 2. Wird der Fensterluftwechsel bzw. der Fensterluftwechsel und die Beschattung berücksichtigt, wird für den Standort Varna problemlos die Gebäudekategorie 1 erreicht.

Am Gebäudestandort Sofia werden den einzelnen Simulationsvarianten (mit einer Ausnahme) dieselben Kategorien zugeordnet wie am Standort Varna. Nur die Variante mit WDVS und ohne raumkühlende Maßnahmen (siehe Abbildung 66 - Sofia mD 1) liegt nicht wie zuvor zwischen Kategorie 3 und 4, sondern zwischen Kategorie 2 und 3.

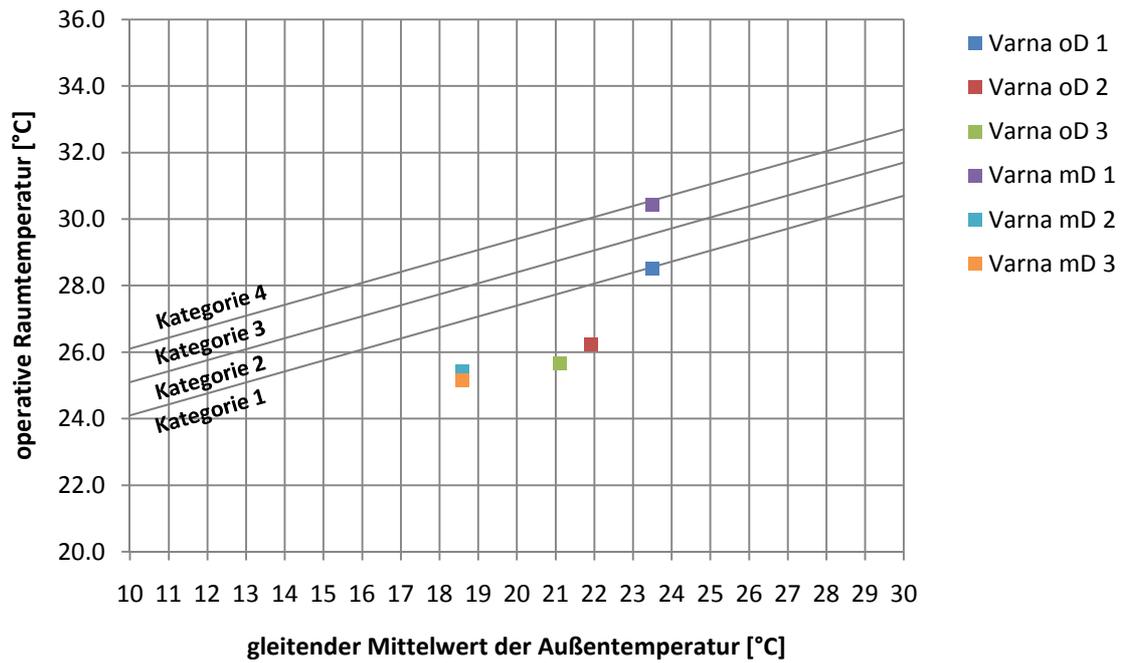


Abbildung 65: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Varna

(Varna oD bzw. mD 1 = Grundkombination

Varna oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Varna oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung d. Fenster)

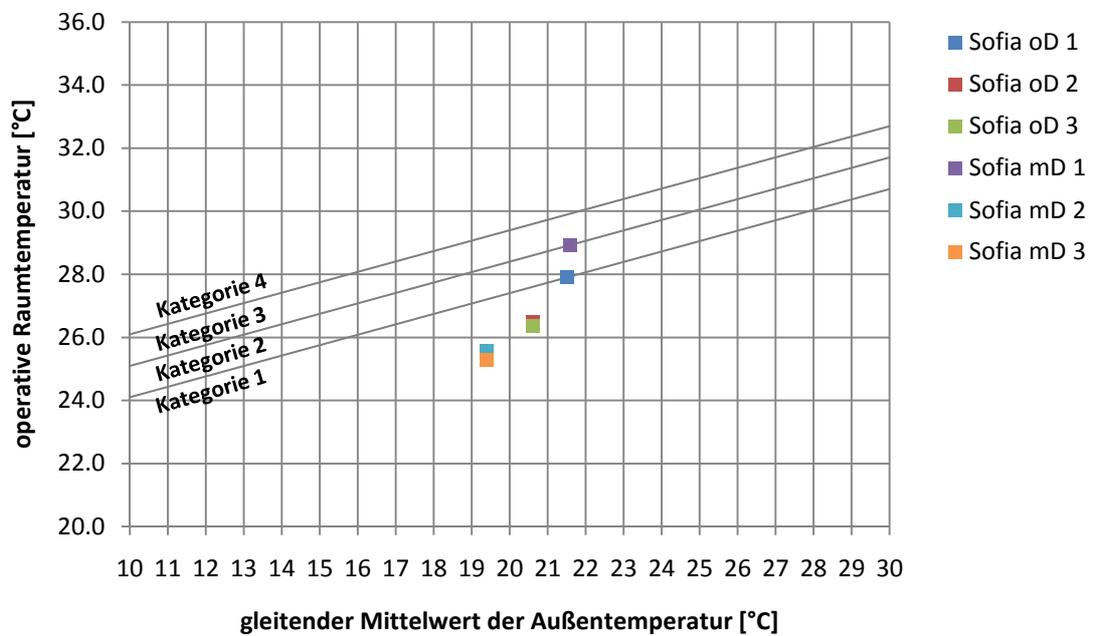


Abbildung 66: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Sofia

(Sofia oD bzw. mD 1 = Grundkombination

Sofia oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Sofia oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

Die Klassifizierung nach ÖNORM EN 15251 [ONO07] ergibt am Gebäudestandort Izmir ein anderes Bild als an den übrigen Standorten (siehe Abbildung 67). Nur für die Varianten Izmir mD 2 (mit WDVS, mit nächtlichem Dauerlüften, ohne Verschattung der Fensterflächen) und Izmir mD 3 (mit WDVS, mit nächtlichem Dauerlüften, mit Verschattung der Fensterflächen) ergibt sich die Gebäudekategorie 1. Alle anderen Simulationsvarianten befinden sich im Bereich der Kategorie 4.

Ohne WDVS kann bei den klimatischen Bedingungen am Gebäudestandort Izmir (mit den untersuchten Maßnahmen) kein zufriedenstellendes Raumklima erreicht werden.

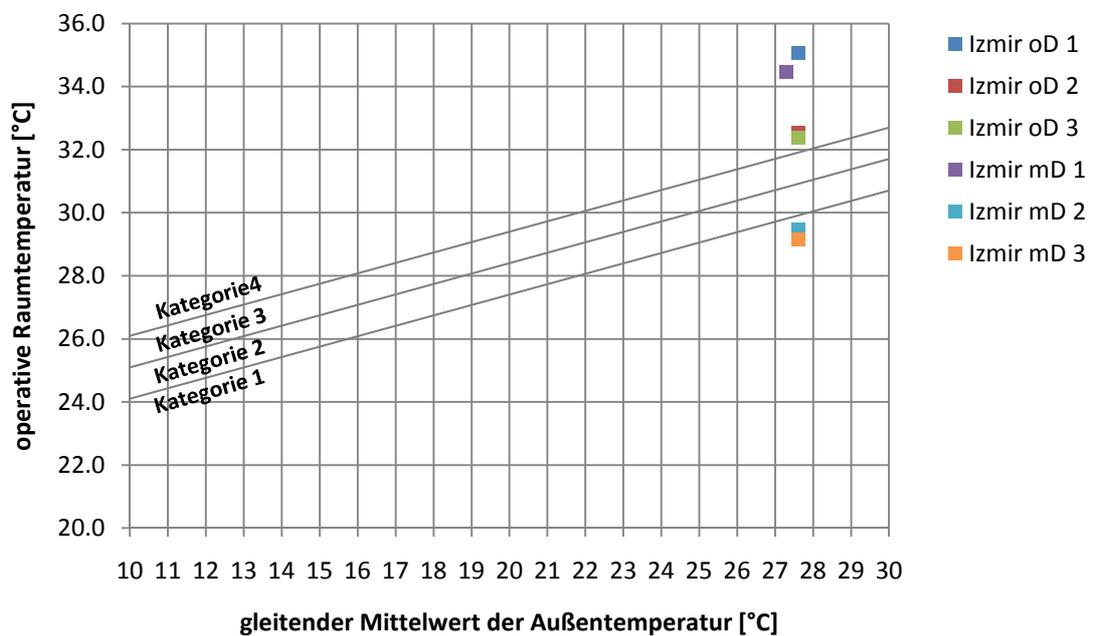


Abbildung 67: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Izmir

(Izmir oD bzw. mD 1 = Grundkombination

Izmir oD bzw. mD 2 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften

Izmir oD bzw. mD 3 = Grundkombination + nächtliches Dauerlüften + Verschattung der Fenster)

7. Zusammenfassung

Anhand von experimentellen und numerischen Untersuchungen wird in dieser Arbeit der Einfluss von WDVS auf das Sommerverhalten von Gebäuden unter verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht.

Das durchgeführte Experiment zeigt, dass der über einen längeren Zeitraum gemittelte Wärmestrom durch die opaken Bauteile eines Gebäudes von innen nach außen verläuft. Das bedeutet, dass über diese Bauteile Wärme aus dem Raum abgeführt wird. Durch die Herstellung eines WDVS wird dem Wärmetransport ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt. Aus den Ergebnissen des Experiments kann abgeleitet werden, dass die durchschnittliche Raumtemperatur während des Sommers in einem Gebäude ohne außenliegende Dämmebene niedriger ist, als in einem Gebäude mit WDVS. Die Analyse des Experiments zeigt jedoch auch, dass die Innentemperaturspitzen bei hohen Außenlufttemperaturen in Gebäuden mit WDVS weniger ausgeprägt sind, als in Gebäuden ohne WDVS.

Mit Hilfe von dynamischen Gebäudesimulationen wird im numerischen Untersuchungsteil dieser Arbeit auch die Wirksamkeit temperatursenkender Maßnahmen untersucht. Neben dem Einfluss von WDVS auf die Innenraumtemperaturen, wird die Effektivität nächtlicher Dauerlüftung, sowie die Wirksamkeit der Verschattung von Fensterflächen analysiert.

Wird das von der ÖNORM B 8110–3 [ONO999] geforderte Dauerlüften der Räume während der Nacht nicht eingehalten, stellen sich in Gebäuden mit WDVS tendenziell höhere Innentemperaturen als in Gebäuden ohne WDVS ein. Durch konsequentes Lüftungsverhalten der Bewohner lassen sich die Raumtemperaturen jedoch ordentlich absenken. Speziell für Gebäude mit WDVS ist ein hoher nächtlicher Fensterluftwechsel vorteilhaft. Wird die verhältnismäßig kalte Nachtluft zum Kühlen eines Gebäudes genutzt, hilft der hohe Wärmedurchgangswiderstand der Wärmedämmung, die Räume unter Tags auf einem angenehmen Temperaturniveau zu halten. Umso höher die Außenlufttemperaturen an einem Gebäudestandort sind, umso bedeutender wird dieser Effekt.

Da die für die Untersuchungen gewählte Gebäudegeometrie nur einen geringen Anteil an transparenten Flächen aufweist und die verbauten Fenster einen niedrigen Energiedurchlassgrad aufweisen, ist der Einfluss von Verschattungsvorrichtungen auf die sich einstellenden Raumtemperaturen äußerst gering. Die konsequente Belüftung des Gebäudes während der Nacht hat wesentlich mehr Potential zur Reduktion der Raumtemperaturen.

Resümee:

Wird das von der ÖNORM B 8110-3 [ONO99] geforderte nächtliche Dauerlüften über die Fenster nicht eingehalten, neigen Gebäude mit WDVS eher zur sommerlichen Überwärmung als Gebäude ohne WDVS.

Durch konsequenten nächtlichen Fensterluftwechsel lassen sich die Vorteile von WDVS jedoch auch im Sommer nutzen und es stellen sich in Gebäuden mit WDVS niedrigere Innenraumtemperaturen ein als in Gebäuden ohne WDVS.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wärmefluss [RIC08].....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Wärmedurchganges durch ein Bauteil [FIS08]	6
Abbildung 3: Zulässige Innentemperaturen von Gebäuden ohne Kühlanlagen in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur [ONO07].....	15
Abbildung 4: Vorgehensweise zur Beantwortung der zentralen Fragestellung der Diplomarbeit	22
Abbildung 5: fotografische Außenansicht des Gebäudes in der Adolf-Blamauer-Gasse 1-3.....	24
Abbildung 6: planerische Außenansicht des Gebäudes in der Adolf-Blamauer-Gasse 1-3	24
Abbildung 7: Grundriss des Gebäudeteils in dem sich die Versuchsräume befinden	25
Abbildung 8: Wandaufbau im Bereich der Fensterüberlager vor Herstellung des WDVS.....	26
Abbildung 9: Regelwandaufbau vor Herstellung des WDVS	26
Abbildung 10: Anordnung der gesetzten Anker an der Fassade	28
Abbildung 11: „Rand-Wulst-Punkt Methode“ zum Kleben der Dämmung	28
Abbildung 12: Aufbringen des Unterputzmörtels auf das EPS	29
Abbildung 13: Wandaufbau im Bereich der Fensterüberlager nach Herstellung des WDVS.....	30
Abbildung 14: Regelwandaufbau der Außenwand nach Herstellung des WDVS.....	30
Abbildung 15: Außenansicht des Gebäudes nach der Installation der Messanlage	33
Abbildung 16: Positionierung der einzelnen Messsensoren im Grundriss	35
Abbildung 17: gemessener Außentemperaturverlauf (PT28) von 4.8.2010 bis 22.9.2010	37
Abbildung 18: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 5.8.2010 bis 11.8.2010	38
Abbildung 19: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 12.8.2010 bis 18.8.2010	38
Abbildung 20: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 19.8.2010 bis 25.8.2010	39
Abbildung 21: Vergleich der in den drei Räumen gemessenen operativen Raumtemperaturen (PT5, PT20, PT25) und der Außentemperatur (PT28) von 26.8.2010 bis 1.9.2010	39
Abbildung 22: Vergleich zwischen den operativen Innenraumtemperaturen und der Außenlufttemperatur als Durchschnitt über den Zeitraum von 5.8.2010 bis 2.9.2010...	40

Abbildung 23: Zusammenhang zwischen den gemessenen Wärmestromdichten Q7 und Q8 (Raum 3 - ohne WDVS) und den dort gemessenen Temperaturen; dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010	42
Abbildung 24: Zusammenhang zwischen den gemessenen Wärmestromdichten Q3 und Q4 (Raum 1 - mit WDVS) und den dort gemessenen Temperaturen; dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010.....	43
Abbildung 25: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 5.8.2010 bis 11.8.2010.....	44
Abbildung 26: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 12.8.2010 bis 18.8.2010.....	44
Abbildung 27: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 19.8.2010 bis 25.8.2010.....	45
Abbildung 28: Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS); dargestellter Zeitraum: 26.8.2010 bis 1.9.2010.....	45
Abbildung 29: Darstellung der über den Zeitraum von 4.8.2010 bis 22.9.2010 integrierten Wärmestromdichteverläufe der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum3 ohne WDVS).	47
Abbildung 30: Vergleich der von 5.8.2010 bis 22.9.2010 durchschnittlich gemessenen Wärmestromdichten der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum 3 – ohne WDVS).....	47
Abbildung 31: Vergleich der von 9.8.2010 bis 13.8.2010 durchschnittlich gemessenen Wärmestromdichten der Wärmestrommessfolien Q1, Q2, Q3, Q4 (Raum 1 – mit WDVS), Q5, Q6 (Raum 2 – mit WDVS) und Q7, Q8 (Raum 3 – ohne WDVS).....	48
Abbildung 32: : Vergleich der gemessenen Wärmestromdichten Q3 (Raum 1 – mit WDVS) und Q7 (Raum 3 – ohne WDVS) während der Hitzeperiode von 9.8.2010 bis 13.8.2010....	49
Abbildung 33: verwendete Drahtgittermodelle für einidimensionale Bauteilsimulationen mit HAM3D (links: Position P7/8, mitte: Position P1, P3/4, P5/6, rechts: Position P2).....	54
Abbildung 34: verwendete Drahtgittermodelle für zweidimensionale Bauteilsimulationen mit HAM3D (links: vertikaler Schnitt der Position P7/8, mitte: vertikaler Schnitt der Position P1, P3/4, P5/6, rechts: horizontaler Schnitt der Position P2).....	55
Abbildung 35: Vergleich zwischen gemessenem und ein- bzw. zweidimensional simuliertem Wärmestrom an der Position P7/8 (Raum 1 – ohne WDVS).....	56
Abbildung 36: Vergleich zwischen gemessenem und ein- bzw. zweidimensional simuliertem Wärmestrom an der Position P3/4 (Raum 1 – mit WDVS)	57

Abbildung 37: Vergleich des stationären U-Werts Ustat mit dem effektiven U-Wert aus der Bauteilsimulation Ueff,sim und dem unter Berücksichtigung der solaren Einstrahlung und der Infrarotabstrahlung berechneten effektiven U-Wert Ueff,calc.....	63
Abbildung 38: Variantenkombinationen für die Gebäudesimulation.....	65
Abbildung 39: geografische Lage der untersuchten Gebäudestandorte [STE10].....	65
Abbildung 40: Grundriss des Einfamilienhauses (links: Erdgeschoß, rechts: Obergeschoß)	67
Abbildung 41: virtuelles Gebäude (links: Drahtgittermodell, rechts: fotorealistische Darstellung).....	68
Abbildung 42: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Wien aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres.....	76
Abbildung 43: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Varna aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres.....	77
Abbildung 44: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Sofia aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres.....	77
Abbildung 45: Globalstrahlung und Außenlufttemperatur für den Gebäudestandort Izmir aus den IWEK Wetterdatensätzen für den Zeitraum eines Jahres.....	78
Abbildung 46: Vergleich der maximalen Außentemperaturen und der maximalen operativen Raumtemperaturen aller Varianten.....	79
Abbildung 47: Vergleich der durchschnittlichen Außentemperaturen und der durchschnittlichen operativen Raumtemperaturen aller Varianten über den Zeitraum von 1.7. bis 31.8....	80
Abbildung 48: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	82
Abbildung 49: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	82
Abbildung 50: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	83
Abbildung 51: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	83

Abbildung 52: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	84
Abbildung 53: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	84
Abbildung 54: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	85
Abbildung 55: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	85
Abbildung 56: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	86
Abbildung 57: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. ohne Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	86
Abbildung 58: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens und Vernachlässigung von Verschattungsmaßnahmen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	87
Abbildung 59: Darstellung der operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir zwischen 1.7. und 31.8. unter Berücksichtigung nächtlichen Dauerlüftens sowie der Verschattung von Fensterflächen für Wandaufbauten mit WDVS (blaue Linie) und Wandaufbauten ohne WDVS (rote Linie).....	87
Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Wien	89
Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Varna.....	89

Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Sofia	90
Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der auftretenden operativen Raumtemperaturen am Gebäudestandort Izmir.....	90
Abbildung 64: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Wien.....	92
Abbildung 65: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Varna	93
Abbildung 66: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Sofia.....	93
Abbildung 67: Klassifizierung des Gebäudemodells am Standort Izmir	94

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erforderliche immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,l}$ in Abhängigkeit vom immisionsflächenbezogenen stündlichen Luftvolumenstrom $V_{L,s}$...	18
Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Messgeräte, Einteilung nach Räumen und Zuweisung von Kurzbezeichnungen und Positionen.....	34
Tabelle 3: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte der Wandaufbauten im Bereich der Wärmestrommessfolien Q1, Q3 & Q4, Q5 & Q6 (Positionen: P1, P3/4, P5/6).....	51
Tabelle 4: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte des Wandaufbaus im Bereich der Wärmestrommessfolie Q2 (Position: P2).....	51
Tabelle 5: Schichtaufbau und zugehörige Materialkennwerte der Wandaufbauten im Bereich der Wärmestrommessfolien Q7 & Q8 (Position: P7/8).....	52
Tabelle 6: relevante Parameter des HAM3D Wetterdatenfiles	53
Tabelle 7: simulierter effektiver U-Wert für den eindimensionalen Fall	59
Tabelle 8: Zusammensetzung der Wärmemenge Q_{calc} , und der daraus errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{eff,calc}$ für die verschiedenen Positionen	62
Tabelle 9: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Außenwand ohne WDVS	68
Tabelle 10: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Außenwand mit WDVS.....	69
Tabelle 11: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Dach für Variante ohne WDVS.....	69
Tabelle 12: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Dach für Variante mit WDVS.....	70
Tabelle 13: Materialkennwerte und Schichtaufbau - erdberührender Boden	70
Tabelle 14: Materialkennwerte und Schichtaufbau - erdberührender Boden im Bereich der Zonen 4 und 5	71
Tabelle 15: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Zwischendecke.....	71
Tabelle 16: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Zwischendecke im Bereich der Zonen 4, 5 und 6.....	72
Tabelle 17: Materialkennwerte und Schichtaufbau - massive Innenwand.....	72
Tabelle 18: Materialkennwerte und Schichtaufbau - leichte Innenwand	72
Tabelle 19: Materialkennwerte und Schichtaufbau - Stiege	73
Tabelle 20: Innere Lasten und Luftwechsel aus der Nutzung des Gebäudes [ONO10a].....	75

11. Literaturverzeichnis

- [ASH01] ASHRAE (2001). *International Weather for Energy Calculations*. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data2.cfm/region=6_europe_wmo_region_6 [Datum des Zugriffs: 21.11.2010].
- [AUS10] Austrotherm GmbH (2010). *Produktdatenblatt Austrotherm EPS F-Plus*. URL: http://www.austrotherm.at/upload/pdb/pdb_EPS_F_Plus.pdf [Datum des Zugriffs: 6.8.2010].
- [BLA02] Bläsi, W. (2002). *Bauphysik*. Haan-Gruiten: EUROPA Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co.
- [FIS08] Fischer, H. M., Freymuth, H., Häupl, P., Hormann, M., Jenisch, R., & Stohrer, M. (2008). *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH.
- [LIE08] Liersch, K. W., & Langer, N. (2008). *Bauphysik kompakt*. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.
- [LOH01] Lohmeyer, G. C. (2001). *Praktische Bauphysik*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner.
- [LUT02] Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H., Freymuth, H., Krampf, L., Petzold, K. (2002). *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: B.G.Teubner.
- [NEU09] Neumann, H. (2009). *Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme*. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG.
- [ONO99] ÖNORM B 8110-3. (1999). *Wärmeschutz im Hochbau. Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [ONO05a] ÖNORM EN ISO 13791. (2005). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2004)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [ONO05b] ÖNORM EN ISO 13792. (2005). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Vereinfachtes Verfahren (ISO 13791:2004)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [ONO07] ÖNORM EN 15251. (2007). *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [ONO10a] Vorschlag ÖNORM B 8110-3. (2010). *Wärmeschutz im Hochbau – Vermeidung der sommerlichen Überwärmung*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

-
- [ONO10b] ÖNORM EN ISO 10456. (2010). Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009). Wien: Österreichischen Normungsinstitut.
- [ONV] ÖNORM V 31. (2001). Katalog für wärmeschutztechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [OST07] Österreichisches Institut für Bautechnik. (2007). *OIB-Richtlinien*. URL: <http://www.oib.or.at> [Datum des Zugriffs: 24.7.2010]
- [RIC08] Riccabona, C., & Bednar, T. (2008). *Baukonstruktionslehre 4*. Wien: Wissen ist Manz.
- [STE10] StepMap GmbH (2010). URL: <http://www.stepmap.at> [Datum des Zugriffs: 28.11.2010].
- [WOP10] Wopfinger Baustoffindustrie GmbH (2010). *Produktdatenblatt Baunit Klebespachtel*. URL: http://www.baunit.at/upload/pimdam/pdb/Baunit_KlebeSpachtel.pdf [Datum des Zugriffs: 6.8.2010].