

Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design

Experimentelle und numerische Untersuchungen an einem solarselektiven Wärmedämmsystem

Peter Steininger

Vollständiger Abdruck der von
der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr. Thomas Hamacher
Prüfende der Dissertation:	1. Prof. Dr.-Ing. Matthias Gaderer
	2. Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud

Die Dissertation wurde am 02.07.2021 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die
TUM School of Engineering and Design am 21.03.2022 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts „MAGGIE“ (Energetische Modernisierung des genossenschaftlichen Wohnquartiers Margaretenau in Regensburg), bei dem ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg im Zeitraum von November 2017 bis Juli 2021 mitwirken durfte. An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen im Projekt meinen Dank aussprechen, die mich in vielfältiger Art und Weise unterstützt haben und einen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Gaderer für die Betreuung dieser Arbeit sowie für seine hilfreichen und konstruktiven Anmerkungen. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud danken, der mich auf meinem Weg mit vielen produktiven Gesprächen begleitet hat. Sein enormes Interesse an der Thematik und die wertvollen und kritischen Kommentare haben zur stetigen Verbesserung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr. Thomas Hamacher danke ich für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Herrn Matthias Giebisch danke ich für die aufschlussreichen und intensiven Diskussionen, seine konstruktiven Anregungen sowie die Unterstützung bei der Herstellung der Versuchskörper für die experimentellen Untersuchungen. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern des Labors Sorptionsprozesse der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg, die durch ihre wertvollen Anmerkungen zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.

Bei meinen Eltern möchte ich mich für die stetige Begleitung auf meinem eingeschlagenen Lebensweg bedanken. Nicht zuletzt möchte ich mich insbesondere bei meiner Frau Franziska für die anhaltende Unterstützung, die Geduld und den Verzicht auf die gemeinsame Zeit während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Regensburg, im Juni 2022
Peter Steininger

Kurzfassung

Zur Erreichung der von der Bundesregierung gesteckten Ziele, bis zum Jahr 2050 den Primärenergiebedarf im Gebäudesektor und die Treibhausgasemissionen beträchtlich zu reduzieren, kommt der nachhaltigen und zukunftsorientierten energetischen Sanierung von Fassaden an Bestandsgebäuden besondere Bedeutung zu. Für die Applikation an Außenwänden steht eine Vielzahl an herkömmlichen und neuartigen Dämmsystemen zur Verfügung, die entweder eine signifikante Erhöhung des thermischen Widerstands der Gebäudehülle oder die Nutzung der Sonne als zusätzliche Energiequelle ermöglichen. Um die vorteilhaften Eigenschaften der Erzielung winterlicher solarer Gewinne, des sommerlichen Überhitzungsschutzes und der hohen Dämmwirkung an sonnenlosen Tagen in einem Dämmsystem zu vereinen, unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte, sind Entwicklungen im Bereich von innovativen Fassadensystemen notwendig.

Das Ziel dieser Arbeit war die konstruktive Entwicklung sowie die experimentelle und numerische Untersuchung eines rein mineralischen solarselektiven Wärmedämmsystems, das die oben genannten Zielsetzungen erfüllt. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems wurden an einem Prototyp, in einem eigens konzipierten Differenzklimakammerprüfstand, stationäre und dynamische Untersuchungen zum winkelabhängigen Solarstrahlungs- und Wärmetransport durchgeführt und bauphysikalische Kenngrößen, die einen Vergleich mit gängigen Dämmsystemen erlauben, abgeleitet. Der experimentell ermittelte winkelabhängige Gesamtenergiedurchlassgrad, der als stationäre Kenngröße zur Bewertung der Solarstrahlungsleitung herangezogen wird, zeigt ein Maximum im Auslegungspunkt für Wintermonate (19° Einstrahlwinkel) und kann für hohe Sonnenstände, zur Vermeidung von sommerlichen Überhitzungseffekten, signifikant reduziert werden.

Darüber hinaus wurden die experimentellen Ergebnisse zur Validierung von stationären und dynamischen multiphysikalischen Simulationsmodellen des solarselektiven Wärmedämmsystems eingesetzt, welche ein tieferes Verständnis des Wärme- und Strahlungstransports ermöglichen. Unter Verwendung der validierten Simulationsmodelle wurden, ausgehend vom Prototyp, die wesentlichen konstruktiven Einflussfaktoren auf die Solarleitung und die Dämmwirkung des Systems ermittelt und das Verbesserungspotential entsprechend quantifiziert. Zudem wurden in einer jährlichen simulativen Untersuchung, unter Verwendung realer Wetterdaten, mithilfe zweier verbesserter Varianten des solarselektiven Wärmedämmsystems, die Heizenergieeinsparpotentiale in der Winter- und Übergangszeit gegenüber einer herkömmlich gedämmten Wandkonstruktion nachgewiesen.

Abstract

In order to reach the objectives of the Federal Government to considerably reduce the primary energy demand in the building sector and greenhouse gas emissions by the year 2050, the sustainable and future-oriented energetic retrofitting of existing buildings' facades is of particular importance. A variety of conventional and novel thermal insulation systems are available for the application on exterior walls, which allow either a significant increase of the thermal resistance of the building envelope or the use of the sun as an additional energy source. In order to combine the beneficial properties of obtaining winter solar gains, summer overheating protection and high thermal insulation on sunless days in one insulating system, while taking into account ecological aspects, developments in the field of innovative facade systems are necessary.

The objective of this work was the development as well as the experimental and numerical investigation of a purely mineral solar selective thermal insulation system that meets the aforementioned objectives. In order to assess the performance of the developed system, steady state and dynamic investigations of the angle-dependent solar irradiation and heat transport were carried out using a prototype in a differential climatic chamber test bench, so that characteristic building physics parameters, which allow a comparison with conventional thermal insulation systems, can be derived. The experimentally determined angle-dependent total solar energy transmittance, which is used as a steady state parameter for the assessment of the solar radiation transmission through the system, shows a maximum at the design point in winter months (19° incidence angle) and can be significantly reduced for high sun angles, thus avoiding overheating effects in summer.

Furthermore, the experimental results were used for the validation of steady state and dynamic multiphysical simulation models of the solar selective thermal insulation system, which allow a deeper understanding of the heat and radiation transport. Using the validated simulation models, based on the prototype, the main constructive factors influencing the solar transmission and the thermal insulation performance of the system were determined and the potential for improvements was quantified accordingly. In addition, in a yearly simulation study using real weathering data, two improved variants of the solar selective thermal insulation system were used to show the heating energy savings in the winter and transition period compared to a conventionally insulated wall construction.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	9
2.1 Klassifizierung von Wärmedämmmaterialien und -systemen	9
2.2 Konventionelle Wärmedämmmaterialien	10
2.3 Neue Materialtechnologien	11
2.3.1 Gasgefüllte- und Vakuum-Isolations-Paneele	11
2.3.2 Hochleistungswärmedämmputze	14
2.3.3 Transparente Wärmedämmsysteme	17
2.3.4 Phasenwechselmaterialien	25
2.4 Abgrenzung der eigenen Arbeit	32
3 Experimenteller Versuchsaufbau und untersuchte Wandkonstruktionen	35
3.1 Zielsetzung	35
3.2 Prüfstandskomponenten	36
3.2.1 Differenzklimakammer und Wandprobenhalter	37
3.2.2 Solarsimulator	37
3.2.3 Datenerfassung und Sensorik	39
3.3 Wandkonstruktionen	40
3.3.1 Grundkörper	41
3.3.2 Ungedämmte Bestandswandkonstruktion (WK1)	42
3.3.3 Gedämmte Wandkonstruktion mit Mikrohohlglasskugel-Dämmputz (WK2)	43
3.3.4 Gedämmte Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3)	44
3.3.5 Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem (WK4)	45
3.3.6 Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem und PCM-Schicht (WK5)	48
3.4 Zusammenfassung	49

4	Verfahren zur Ermittlung des Wärmeleitwerts im Wandprüfstand	51
4.1	Zielsetzung	51
4.2	Methodik	52
4.2.1	Eindimensionale Betrachtung bei ungedämmten Wandkonstruktionen	52
4.2.2	Parameteridentifikationsverfahren für gedämmte Wandkonstruktionen	53
4.2.3	Experimentelle Versuchsbedingungen	58
4.3	Ergebnisse und Diskussion	58
4.3.1	Wärmeleitwert der ungedämmten Wandkonstruktion	59
4.3.2	Wärmeleitwert bei gedämmten Wandkonstruktionen	59
4.3.2.1	Identifikation der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht	59
4.3.2.2	Validierung des Parameteridentifikationsverfahrens	61
4.4	Zusammenfassung	64
5	Verfahren zur Messung des solaren Gewinns im Wandprüfstand	65
5.1	Zielsetzung	65
5.2	Entwickelte Messverfahren	66
5.2.1	Stationäre kalorimetrische Vermessung	66
5.2.2	Dynamisches Testverfahren und Leistungskenngrößen	70
5.2.3	Experimentelle Versuchsbedingungen	74
5.3	Ergebnisse und Diskussion	76
5.3.1	Effektive Wärmeleitfähigkeit und Gesamtenergiedurchlassgrad der stationären Untersuchung	77
5.3.2	Temperaturanstieg und -anstiegsrate der dynamischen Untersuchung	78
5.3.3	Wandinnenseitiger solarer Gewinn und Wärmeverlustreduktionsfaktor	82
5.3.4	Einfluss des Azimut auf die dynamische Temperaturerhöhung	85
5.3.5	Einfluss der PCM-Schicht auf den dynamischen Wärmetransport	86
5.4	Zusammenfassung	89
6	Modellbildung, Simulation und Validierung virtueller Wandkonstruktionen	93
6.1	Zielsetzung	93
6.2	Methodik	94
6.2.1	Numerische Modellierung	94
6.2.1.1	Dynamisches 1D- und 3D-Modell der ungedämmten (WK1) sowie 3D-Modell der herkömmlich gedämmten (WK2) Wandkonstruktion	94
6.2.1.2	Stationäres und transientes 3D-Modell der solarselektiven Wandkonstruktion (WK4)	97
6.2.2	Quantitative Vergleichskenngrößen zwischen Experiment und Simulation	104

6.3	Ergebnisse und Diskussion	104
6.3.1	Wärmeleit- und -speicherverhalten von WK1	104
6.3.2	Temperaturanstieg hinter der Dämmschicht und dimensionsloser Wärmestrom von WK2	106
6.3.3	Effektive Wärmeleitfähigkeit und Gesamtenergiedurchlassgrad des solarselektiven Wärmedämmsystems	107
6.3.4	Dynamischer Strahlungs- und Wärmetransport von WK4	112
6.4	Zusammenfassung	123
7	Parameterstudie und Jahressimulation zum solarselektiven Wärmedämmsystem	125
7.1	Zielsetzung	125
7.2	Methodik	126
7.2.1	Parameterstudie zum konstruktiven Aufbau	126
7.2.1.1	Länge und Form des Verschlusselements	127
7.2.1.2	Kurzwelliger Absorptionsgrad des Absorbers	127
7.2.1.3	Durchmesser und Flächenanteil der lichtleitenden Elemente	128
7.2.2	Jährliche Untersuchung des Energieeinsparpotentials	128
7.2.2.1	Simulationsmodelle für die jährliche Bilanzierung des Energieeinsparpotentials	129
7.2.2.2	Klimadaten, Auswertezeitraum und quantitative Jahresvergleichskenngrößen	130
7.2.2.3	Berechnungsalgorithmus	132
7.2.2.4	Vereinfachte Berechnungsmethodik	133
7.3	Ergebnisse und Diskussion	135
7.3.1	Parameterstudie	135
7.3.1.1	Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit	135
7.3.1.2	Einfluss auf den Gesamtenergiedurchlassgrad	136
7.3.2	Jährliche Einspareffekte durch das solarselektive Wärmedämmsystem	139
7.3.2.1	Bilanzierung gegenüber einem herkömmlichen Dämmsystem	139
7.3.2.2	Eindimensionales Modell und Kennfeldinterpolation	142
7.4	Zusammenfassung	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	147
8.1	Zusammenfassung	147
8.2	Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	151
	Anhang	167

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verteilung und flächenbezogener Endenergiebedarf des Wohngebäudebestands in Deutschland nach Baujahren [5, 9].	3
1.2	Zeitliche Entwicklung der Absatzmengen am Dämmstoffmarkt [11].	4
1.3	Beispielhafte Darstellung der Abhängigkeit des U -Werts von einer Wand von der Dämmstoffdicke (δ).	5
2.1	Konventionelle Wärmedämmmaterialien und neue Materialtechnologien klassifiziert nach [27].	10
2.2	Relativer Anteil gängiger konventioneller Wärmedämmmaterialien an der Gesamtabatzmenge im Jahr 2014 in Deutschland [11].	11
2.3	Wärmeleitfähigkeit von Luft (λ_{gas}) als Funktion des Gasdrucks (p) für verschiedene Porendurchmesser (δ_P) entsprechend Gleichung (2.3) mit relevanten Materialkenngrößen aus [42].	14
2.4	Wärmeleitfähigkeit (λ) herkömmlicher (Leichtzuschlag in Form von EPS, Perlit o. Ä.) zement- (P1-P8) und natürlich-hydraulisch kalkbasierter (P9-P14) Wärmedämmputze [52] im Vergleich zu neuartigen Hochleistungswärmedämmputzen (AG [53] und GK [54]). Als Vergleichswert ist die Wärmeleitfähigkeit einer EPS-Platte (vgl. Tabelle A.1) dargestellt.	16
2.5	Hochleistungswärmedämmputze mit innovativen Leichtzuschlägen.	17
2.6	Funktionsprinzip der transparenten Wärmedämmung. Reproduziert aus [18].	18
2.7	Geometrische Klassifizierung von transparenten Wärmedämmmaterialien mit einer Übersicht über die für die jeweilige Herstellung verwendeten Materialien [21, 26, 19].	19
2.8	Experimentell ermittelter Transmissionsgrad (τ) von transparenten Wärmedämmmaterialien in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel (φ). Darstellung in Anlehnung an [21] mit Daten aus [75, 76, 77, 78].	21
2.9	Prinzipskizzen von Patentschriften für transparente Wärmedämmsysteme. . .	23
2.10	U - und g -Wert von am Markt verfügbaren transparenten Wärmedämmsystemen mit und ohne Aerogel [26].	24
2.11	Beispielhafte Darstellung ausgewählter, marktverfügbarer transparenter Wärmedämmsysteme für Fassaden ohne Aerogel.	25

2.12	Schmelztemperaturen (T_S) und -wärmen (h_S) verschiedener Phasenwechselmaterialien. Reproduziert aus [105].	26
2.13	Beispielhafte Darstellung einer zeitlichen Verschiebung und Dämpfung der maximalen Innenlufttemperatur sowie der resultierenden Kühlenergieeinsparung durch den Einsatz von PCMs.	29
2.14	Typische Anwendungen von PCM-integrierten Bauelementen in Wandkonstruktionen. Abbildungen entnommen aus [105, 118].	31
2.15	PCM-Verbundplatte DuPont™ Energain® mit einem PCM-Anteil von 60 wt%. Abbildung entnommen aus [105].	31
3.1	Darstellung der Differenzklimakammer bestehend aus einem Außen- und Innenbereich (a und b) sowie einer Wandprobenhalterung (c).	38
3.2	Darstellung des Solarsimulators (a) und der spektralen Strahlungsintensität des Solarsimulators im Vergleich zu ASTM G173 AM1.5G (b).	39
3.3	Grundkörper der Wandkonstruktionen, bestehend aus Vollziegeln und Zementmörtel.	41
3.4	Ungedämmte Bestandswandprobe (WK1).	42
3.5	Spektraler Absorptionsgrad der Außenfarbe ($\alpha_{OS,\lambda}$).	43
3.6	Wandkonstruktion mit Mikrohohlglaskugel-Dämmputz (WK2).	43
3.7	Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3).	44
3.8	Hergestellter Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems und Applikation der Absorber-Klebeschicht.	46
3.9	Spektraler Absorptionsgrad des MHGK-Dämmputzes ($\alpha_{Plaster,\lambda}$) [54] sowie der Absorber-Klebeschicht ($\alpha_{Absorber,\lambda}$) [146, 147].	46
3.10	Auf einem Grundkörper applizierter Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems (WK4) sowie dessen konstruktive Ausführung. Die Nennlängen der Komponenten sind in Millimeter angegeben.	47
3.11	Schematische Darstellung der Bohrungsachsen im solarselektiven Wärmedämmsystem für weitere Varianten von WK4 (WK4-3.4 und WK4-12.1) zur Ermittlung des Azimut-Einflusses in den Prüfstandsuntersuchungen.	48
3.12	Formstabiles PCM-Paneel der Fa. smartpolymer GmbH [119], Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität und Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems mit PCM-Schicht auf einem Grundkörper (WK5). . . .	49
4.1	Schematische Darstellung der ein- ($\dot{Q}_{IS}$) und austretenden ($\dot{Q}_{OS}$) Wärmeströme sowie der verschiedenen Temperaturniveaus (T_{IC} , T_{IS} , T_{OS} und T_{OC}) innerhalb der ungedämmten Wandkonstruktion bei eindimensionalem Wärmetransport. . . .	53

4.2	Schematische Darstellung der ein- ($\dot{Q}_{\text{IS}}$) und austretenden ($\dot{Q}_{\text{OS}}$) Wärmeströme sowie des Randwärmestromverlusts ($\dot{Q}_{\text{R}}$) innerhalb der gedämmten Wandkonstruktion bei dreidimensionalem Wärmetransport.	54
4.3	Geometrie des Simulationsmodells zur Parameteridentifikation der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht.	55
4.4	Flussdiagramm zur Bestimmung des Verlaufs der Zielfunktion $\text{TF}(\lambda)$ des entwickelten Parameteridentifikationsverfahrens.	57
4.5	Normierte Zielfunktion (TF_n) in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht der Wandkonstruktionen WK2 und WK3 für jeweils drei verschiedene Lufttemperaturdifferenzen.	60
4.6	Gemessene (exp) und numerisch berechnete (num) Wärmestromdichte auf der Wandinnen- (IS) bzw. Wandaußenseite (OS) für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht von WK2 aus Tabelle 4.3 in Abhängigkeit von den Lufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 4.2.	62
4.7	Gemessene (exp) und numerisch berechnete (num) Wärmestromdichte auf der Wandinnen- (IS) bzw. Wandaußenseite (OS) für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht von WK3 aus Tabelle 4.3 in Abhängigkeit von den Lufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 4.2.	63
4.8	Oberflächentemperaturverteilung auf der Wandinnen- (a) und Wandaußenseite (b) für die Wandkonstruktion WK2 bei der Lufttemperaturdifferenz WK2-3 aus Tabelle 4.2 für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit aus Tabelle 4.3. .	63
5.1	Schematische Darstellung des kalorimetrischen Testverfahrens zur Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrads am Beispiel des solarselektiven Wärmedämmsystems. Die Umweltrandbedingungen sind blau, die Messgrößen rot markiert.	67
5.2	Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems (SATIS) und experimentelle Versuchsaufbauten.	69
5.3	Schematische Darstellung des Testverfahrens zur Ermittlung der solaren Gewinne am Beispiel der solarselektiven Wandkonstruktion. Die Umweltrandbedingungen sind blau, die Messgrößen rot markiert.	71
5.4	Beispielhafte Darstellung eines typischen Funktionsverlaufs der Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}$) während des dynamischen Testverfahrens zur Ermittlung des solaren Gewinns (SG) und Wärmeverlustreduktionsfaktors (HLRF).	73
5.5	Experimentell ermittelter Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{exp}) des solarselektiven Wärmedämmsystems für verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	78

5.6	Temperaturerhöhung (TR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) sowie auf der Außenwandoberfläche (WK1) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	80
5.7	Temperaturerhöhungsrate (TRR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) während des Bestrahlungsvorgangs.	82
5.8	Dimensionsloser Wärmestrom auf der Wandinnenseite (DLHF) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ) für WK1, WK2 und WK4.	83
5.9	Gemessene Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) für die zwei Varianten WK4-3.4 und WK4-12.1.	86
5.10	Temperatur in der Absorberschicht (T_{abs}) für die solarselektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19°	87
5.11	Wärmestromdichte ($\dot{q}_{\text{IS}}$) auf der Wandinnenseite sowie deren zeitliche Änderung ($\frac{d}{dt}\dot{q}_{\text{IS}}$) für die solarselektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19°	88
6.1	Schematische Darstellung der relevanten physikalischen Einflussgrößen zur dynamischen Modellierung des Wärmetransports innerhalb der Wandkonstruktion WK1.	95
6.2	Randbedingungen auf der Wandaußenseite der Wandkonstruktion WK1 bei der dynamischen Simulation. Die farblich umrandeten Flächen sind der mathematischen Beschreibung in Tabelle 6.2 zugeordnet.	96
6.3	Geometrien der stationären Modelle des solarselektiven Wärmedämmsystems in den Stadien 2 und 3.	98
6.4	Transientes Modell der Wandkonstruktion WK4, bestehend aus dem solarselektiven Wärmedämmsystem und einem innenseitig verputzten Vollziegelmauerwerk. Die Zuordnung der Materialien entspricht der aus Abbildung 6.3b.	100
6.5	Gebiete des stationären bzw. transienten Modells der Wandkonstruktion WK4, in denen die Berechnung des Strahlungstransports erfolgt.	102
6.6	Vom Strahlungseinlass (a in Abbildung 6.5) ausgehende, konische Verteilung der Lichtstrahlen.	103
6.7	Gemessene (exp, tc) und simulierte (1D, 3D) wandinnen- (T_{IS}) und wandaußenseitige (T_{OS}) Oberflächentemperaturen der Wandkonstruktion WK1 sowie die gemessene Luftinnen- (T_{IC}) und Luftaußentemperatur (T_{OC}). . . .	105

6.8	Temperaturerhöhung hinter der Dämmschicht (TR) und dimensionsloser Wärmestrom (DLHF) auf der Wandinnenseite von WK2.	107
6.9	Experimentell (exp) und numerisch (num) bestimmte effektive Wärmeleitfähigkeiten (λ_{eff}) des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 2 für die Kammerlufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1 unter Berücksichtigung von Wärmeleitung (cond), Konvektion (conv) und Wärmestrahlung (rad).	109
6.10	Absolute Fluidgeschwindigkeit innerhalb des lichtleitenden Elements des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 2 für die höchste untersuchte Kammerlufttemperaturdifferenz $\Delta T_{\text{IC-OC},3}$ aus Tabelle 5.1.	109
6.11	Experimentell (exp) und numerisch (num) bestimmte effektive Wärmeleitfähigkeiten (λ_{eff}) des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 für die Kammerlufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1 unter Berücksichtigung von Wärmeleitung (cond) und Wärmestrahlung (rad).	110
6.12	Experimentell (exp) and numerisch (num) bestimmter Gesamtenergiedurchlassgrad (g) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) für das stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3.	111
6.13	Strahlungsleistung, gesamter Wandwärmestrom ($\dot{Q}_{\text{ray}}$) und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung (DARD) innerhalb des lichtleitenden Elements für verschiedene Einstrahlwinkel.	113
6.14	Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur im Absorber-Klebemörtel (T_{abs}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	115
6.15	Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur auf der Wandinnenseite (T_{IS}) vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) sowie die Luftinnentemperatur (T_{IC}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	117
6.16	Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$) vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	118
6.17	Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) für die zwei Varianten WK4-3.4 und WK4-12.1.	119
6.18	Simulierte ein- ($\dot{q}_{\text{abs,ein}}$) und austretende ($\dot{q}_{\text{abs,aus}}$) Wärmestromdichte der Absorberschicht sowie flächenspezifische zeitliche Änderung der inneren Energie ($\frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).	120
6.19	Simulierte flächengemittelte Temperatur (T) und solare Wärmeeindringtiefe (z_E) in der Wandkonstruktion WK4 zu verschiedenen Zeitpunkten während des Bestrahlungsvorgangs für Einstrahlwinkel (φ) von 19° und 50°.	121

6.20	Solare Wärmeeindringtiefe (z_E) und volumengemittelte Temperatur der Speichermasse (T_V) während des achtstündigen Bestrahlungsvorgangs für die Einstrahlwinkel (φ) von 19° und 50°	122
7.1	Referenzmodell als Ausgangszustand zur Verbesserung des solarselektiven Wärmedämmsystems.	126
7.2	Variation der Länge und Form des Verschlusselements.	128
7.3	Variation der Durchmesser und des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente.	129
7.4	Verwendete Simulationsmodelle für die Untersuchung des jährlichen Energieeinsparpotentials.	130
7.5	Testdatensatz, Tagesmitteltemperatur und Auswertzeitraum zur Untersuchung der Energieeinsparung durch die lichtleitenden Elemente.	131
7.6	Interpolationsverfahren für die Sonnenposition und die Außenlufttemperatur in den Jahressimulationen.	132
7.7	Flussdiagramm zur Kopplung des Wärme- und Solarstrahlungstransports bei der jährlichen Untersuchung der Wandkonstruktionen.	133
7.8	Schematische Darstellung der eindimensionalen Modellierung der Strahlungsverteilung im lichtleitenden Element von „Solarselektiv #1“ über eine Wärmequellendichte ($\dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp}(t))$).	134
7.9	Einfluss verschiedener Konstruktionsmerkmale auf die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}).	136
7.10	Einfluss verschiedener Konstruktionsmerkmale auf den Gesamtenergiedurchlassgrad (g).	138
7.11	Temperatur in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (T_{abs}) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).	140
7.12	Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).	141
7.13	In den Innenraum abgegebene Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}} < 0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).	142
7.14	Bilanzierung der Wärmeverluste mit Wärmeleitung (WV WL), der Wärmeverluste mit Wärmeleitung und Wärmestrahlung (WV WL+WS), der effektiven solaren Gewinne (SGH) und der effektiven Überhitzung (UEH) der solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2) gegenüber der herkömmlichen Wandkonstruktion für verschiedene Auswertzeiträume.	143
7.15	Um φ -Achse symmetrisches Kennfeld der Strahlungswärmeströme der solarselektiven Wandkonstruktion #1 für $\Delta\varphi = \Delta\psi = 2^\circ$ und $\Delta z = 5 \text{ mm}$	144

7.16 Vergleich zwischen der Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$) der solarselektiven Wandkonstruktion #1 und dem eindimensionalen Modell mit Kennfeldinterpolation.	144
--	-----

Tabellenverzeichnis

1.1	Quantitative energiepolitische Zielsetzungen der Bundesregierung [1].	1
2.1	Wärmeleitfähigkeit verschiedener Gase bei 25 °C [37].	12
2.2	Physikalische, technische und ökonomische Anforderungen an Phasenwechselmaterialien [106, 104].	27
3.1	Übereinstimmung der integralen Strahlungsintensität des Solarsimulators in spezifischen Wellenlängenbändern mit ASTM G173 AM1.5G.	40
3.2	Materialien und Schichtdicken der ungedämmten Wandkonstruktion (WK1).	42
3.3	Materialien und Schichtdicken der Wandkonstruktion mit Mikrohohlglasskugeldämmputz (WK2).	43
3.4	Materialien und Schichtdicken der Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3).	44
4.1	Bezeichnungen, Materialien und Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten aus Abbildung 4.3a. Zudem sind die farblich umrandeten Oberflächen den mathematischen Randbedingungen zugeordnet.	56
4.2	Lufttemperaturen im Innen- (T_{IC}) und Außenbereich (T_{OC}) zur Ermittlung des Wärmeleitwerts bzw. der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht.	58
4.3	Mittels des Parameteridentifikationsverfahrens bestimmte Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht ($\lambda_{\text{eff, is, } i}$) für jede Lufttemperaturdifferenz, berechnete mittlere Wärmeleitfähigkeit ($\bar{\lambda}_{\text{eff, is}}$) und ermittelter Wärmeleitwert (Λ) für die Wandkonstruktionen WK2 und WK3	61
5.1	Gemessene Innen- (T_{IC}) und Außenlufttemperaturen (T_{OC}) sowie absolute Temperaturdifferenzen (ΔT_{IC-OC}) zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der SATIS Paneele in den drei Herstellungsstadien.	74
5.2	Untersuchte Einstrahlwinkel (φ) und gemessene Strahlungsintensität senkrecht zur Einfallrichtung ($I_{S,\perp}$) des solar selektiven Wärmedämmsystems.	75
5.3	Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), Lufttemperaturen im Innen- (T_{IC}) und Außenbereich (T_{OC}) sowie die Strahlungsintensität auf einer Fläche senkrecht zur Einfallrichtung ($I_{S,\perp}$) zur Ermittlung des solaren Gewinns für verschiedene Wandkonstruktionen.	76

5.4	Gemessene Temperaturen und Wärmestromdichten auf der Wandinnen- (T_{IS} , $\dot{q}_{IS}$) und -außenseite (T_{OS} , $\dot{q}_{OS}$) sowie berechnete effektive Wärmeleitfähigkeiten für jedes Herstellungsstadium gemäß den Gleichungen (5.5) und (5.8).	77
5.5	Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), stationäre Absorbertemperatur ($T_{abs,st}$), maximale Temperaturerhöhung (TR_{max}) sowie Temperaturerhöhungsrate (TRR_{max}) in der Absorber- und hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) bzw. auf der Wandaußenseite (WK1).	79
5.6	Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), Zeit bis erneuten Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), solarer Gewinn (SG), Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) und stationärer Wärmeverlust ($\dot{q}_{st}$) für WK1, WK2 und WK4.	85
5.7	Einstrahlwinkel (φ) und maximale Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR_{max}) für die Wandkonstruktionen WK4, WK4-3.4 und WK4-12.1.	86
6.1	Thermophysikalische Materialeigenschaften für das eindimensionale dynamische Modell der Wandkonstruktion WK1.	95
6.2	Materialkennwerte für die dynamische Modellierung der Wandprobenhalterung aus Abbildung 6.2. Zudem sind die farblich umrandeten Flächen den mathematischen Randbedingungen zugeordnet.	96
6.3	Materialien, Materialeigenschaften und thermische Randbedingungen für die Modelle des solar selektiven Wärmedämmsystems in den Stadien 2 und 3.	98
6.4	Randbedingungen für die Berechnung des Strahlungstransports.	102
6.5	Absolute mittlere ($\Delta \bar{T}_{IS} _t^{t+\Delta t}$) und absolute maximale ($MAX(\Delta T_{IS})_t^{t+\Delta t}$) Abweichung der Oberflächentemperaturen auf der Wandinnenseite der Wandkonstruktion WK1 zwischen dem Experiment und dem 1D- bzw. 3D-Modell.	105
6.6	Stationärer (q_{st}) und tatsächlicher (q) flächenspezifischer Wärmeverlust, solarer Gewinn (SG) und Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) für das Experiment, das 1D- und das 3D-Simulationsmodell von WK1.	106
6.7	Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), absolute mittlere Abweichungen der gemessenen und simulierten Temperaturen in der Absorber-Klebeschicht ($\Delta \bar{T}_{abs} _0^8$ und $\Delta \bar{T}_{abs} _0^{t_{II}}$) sowie die zugehörigen maximalen Abweichungen ($MAX(\Delta T_{abs})_0^8$ und $MAX(\Delta T_{abs})_0^{t_{II}}$) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ).	116
6.8	Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), absolute mittlere Abweichungen der gemessenen und simulierten Temperaturen und Wärmestromdichten auf der Wandinnenseite ($\Delta \bar{T}_{IS} _0^{t_{II}}$ und $\Delta \bar{q} _0^{t_{II}}$) sowie die zugehörigen absoluten maximalen Abweichungen ($MAX(\Delta T_{IS})_0^{t_{II}}$ und $MAX(\Delta \dot{q})_0^{t_{II}}$) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ).	118

7.1	Wesentliche bauphysikalische und konstruktive Eigenschaften der Jahressimulationsmodelle aus Abbildung 7.4.	130
A.1	Bauphysikalische und gebäuderelevante Kennwerte gängiger konventioneller Wärmedämmmaterialien entsprechend ihrer Form [34, 35].	168
A.2	Auflistung verschiedener Hersteller von transparenten Wärmedämmmaterialien sowie zugehörige Strukturen und Materialien [26].	169

1 Motivation und Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel der Bundesregierung stellt die zunehmende Reduktion des Primärenergieverbrauchs dar, die in Tabelle 1.1 über den Zeitraum von 2020 bis 2050 veranschaulicht ist. Das gesteckte Ziel im Jahr 2020, welches bei -20% gegenüber 2008 liegt [1], wurde mit $-18,7\%$ knapp verfehlt [2]. Bei der Erreichung des Energiewendeziels der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 (u. a. Primärenergiebedarf: -50% ggü. 2008) und zur Gewährleistung einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung spielt der Gebäudesektor eine zentrale und entscheidende Rolle. Die Reduktion des Primärenergiebedarfs im Gebäudesektor, die bis zum Jahr 2050 -80% betragen soll, belief sich im Jahr 2014 lediglich auf $-14,8\%$ [1].

Tabelle 1.1: Quantitative energiepolitische Zielsetzungen der Bundesregierung [1].

	2020	2030	2040	2050
Effizienz und Verbrauch				
Primärenergieverbrauch (ggü. 2008)	-20%	—————→		-50%
Bruttostromverbrauch (ggü. 2008)	-10%	—————→		-25%
Primärenergiebedarf Gebäude (ggü. 2008)		—————→		-80%
Wärmebedarf Gebäude (ggü. 2008)	-20%			
Endenergieverbrauch Verkehr (ggü. 2005)	-10%	—————→		-40%
Treibhausgasemissionen				
Treibhausgasemissionen (ggü. 1990)	-40%	-55%	-70%	-80%

Hinzu kommt, dass der Gebäudebereich, bestehend aus den Wohn- und Nichtwohngebäuden, für nahezu ein Drittel der Treibhausgasemissionen, die bis zum Jahr 2050 um -80% ggü. 1990 (vgl. Tabelle 1.1) reduziert werden sollen, verantwortlich ist. Die Treibhausgasemissionen konnten zwar im Jahr 2020 um $-40,8\%$ gegenüber 1990 gesenkt werden, sodass Deutschland in dieser Hinsicht das gesteckte Klimaziel (-40%) erreichen konnte [3], allerdings sind zur Einhaltung der für das Jahr 2050 gesetzten Zielvorgabe von -80% weitere Einsparmaßnahmen, insbesondere im Gebäudebereich, notwendig. Nicht ohne Grund hat der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, „Weltklimarat“) den Gebäudesektor als denjenigen Bereich ausgerufen, der das größte Potential zur Reduktion des Energieverbrauchs

und der Treibhausgasemissionen in einer kosteneffizienten Weise hat [4].

Zur Umsetzung der langfristigen Strategie, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 80 % im Vergleich zu 1990 sowie den Primärenergieverbrauch um 50 % gegenüber 2008 zu reduzieren, muss somit insbesondere der sektorübergreifende gebäuderelevante Endenergieverbrauch, der im Jahr 2014 35 % (3027 PJ) des Gesamtendenergieverbrauchs betrug [5, 6], deutlich reduziert werden.

Der Wohngebäudebestand in Deutschland beläuft sich auf rund 19 Mio. Gebäude mit rund 40 Mio. Wohneinheiten. Dieser Bestand lässt sich entsprechend der Errichtungszeitpunkte der einzelnen Gebäude in Zeitperioden einordnen, die in Abbildung 1.1 dargestellt sind. Hieraus wird ersichtlich, dass 64 % aller Wohngebäude vor dem Inkrafttreten der 1. Wärmeschutzverordnung (WSchV.) im Jahr 1977¹ errichtet wurden. Bis zu diesem Zeitpunkt war das energieeffiziente Bauen nur als technisches Regelwerk in der DIN 4108 verankert. Allerdings gab es keine öffentlich-rechtlichen Vorschriften für den energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden [7]. Aufgrund der damals fehlenden Regularien bezüglich des energieeffizienten Bauens ergeben sich im Vergleich zu Neubauten, an die entsprechend hohe Anforderungen hinsichtlich des Wärmeschutzes durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) gestellt werden [8], sehr hohe flächenspezifische Endenergieverbräuche, die ebenfalls in Abbildung 1.1 dargestellt sind. Beispielsweise beträgt der flächenspezifische Verbrauch von Gebäuden aus der Zeitperiode 2010-2011 nur rund 25 % gegenüber Gebäuden aus dem Zeitraum 1949-1978. In Abbildung 1.1 lässt sich außerdem erkennen, dass die Wohngebäude im Zeitraum 1949-1978 nicht nur den höchsten flächenspezifischen Endenergieverbrauch von $208 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$ aufweisen, sondern auch mit einer Anzahl von 7,02 Mio. zahlenmäßig den größten Anteil ausmachen [9], was das enorme Energieeinsparpotential bei Altbauten vor dem Jahr 1978 aufzeigt.

Auswertungen des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) zeigen, dass bis zum Jahr 2016 rund 50 % aller Wohngebäude mit einer Außenwanddämmung versehen wurden. Bei Altbauten, die vor dem Jahr 1978 errichtet wurden, beträgt dieser Anteil nur knapp 46 %. Berücksichtigt man zusätzlich den Anteil der gedämmten Flächen an der Außenwand, ergibt sich bei allen Wohngebäuden eine effektiv gedämmte Fläche von ca. 42 %. Bei Altbauten vor 1978 beträgt die insgesamt gedämmte Fläche lediglich rund 34 % [10]. Berücksichtigt man zudem, dass Außenwände einen Anteil von knapp über 40 % an der Gebäudehülle einnehmen [5], muss für eine langfristige Energieeffizienzstrategie in Deutschland der Außenfassade von Altbauten eine besondere Aufmerksamkeit im Hinblick auf deren Energieeffizienz zuteilwerden.

Aus den oben genannten Gründen spielt die nachhaltige und zukunftsorientierte Sanierung von Fassaden an Bestandsgebäuden in Deutschland zur Erreichung der klima- und

¹Die 1. WSchV. trat Ende 1977 in Kraft, die praktische Umsetzung dürfte aber erst im darauffolgenden Jahr durchgeführt worden sein, da die Planung von vielen im Jahr 1978 fertiggestellten Gebäuden bereits im Jahr 1977, damit vor dem Inkrafttreten der 1. WSchV., abgeschlossen war.

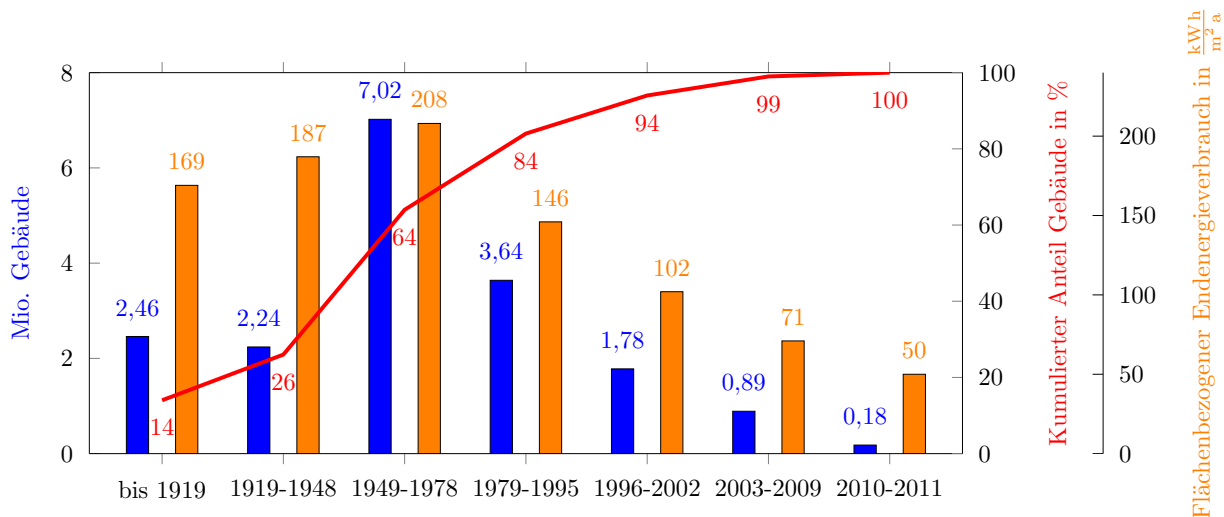


Abbildung 1.1: Verteilung und flächenbezogener Endenergiebedarf des Wohngebäudebestands in Deutschland nach Baujahren [5, 9].

energiepolitischen Ziele eine tragende Rolle.

Quantitativ lassen sich die durchgeführten energetischen Sanierungen durch die Sanierungsrate (jährlich sanierte Gebäudefläche bezogen auf die gesamte Gebäudefläche) ausdrücken, welche sich auf das Vollsanierungsäquivalent² bezieht. Die Sanierungsrate in Deutschland beträgt seit Jahren ca. 0,8 % und ist damit nur knapp halb so hoch wie das vom Bundesministerium gesetzte Ziel von 2 % [11, 12]. Durch entsprechende Sanierungspläne, -konzepte und Förderungen wird, insbesondere auf Quartiersebene in Städten, versucht, die Sanierungsrate deutlich zu erhöhen, da rund 80 % des Gesamtwärmeverbrauchs in Deutschland auf Metropolregionen und Städte fällt [13]. Statistiken der dena aus dem Jahr 2016 zeigen, dass die Absatzzahlen für energieeffiziente Heizungen um ca. 10 % und für Fenster um rund 4 % gestiegen sind. Jedoch ist am Dämmstoffmarkt bei Renovierungen, dessen Absatzmengen in Abbildung 1.2 dargestellt sind, ein gegenläufiger Trend zu erkennen. Hier nahmen über den Zeitraum von 2012-2015 die Absatzmengen um 11 % von 17,85 Mio. m³ auf 15,90 Mio. m³ ab, was sich somit kontraproduktiv auf die Erreichung der klimapolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung auswirkt.

Das energetische Dämmvermögen von Außenwänden lässt sich mithilfe des U -Werts beschreiben, aus welchem der Transmissionswärmeverlust durch das entsprechende Bauteil bei gegebener Temperaturdifferenz bestimmt werden kann. Der U -Wert von Gebäuden lässt sich allerdings nach heutigem Stand der Technik, unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren, nicht in beliebigem Maße reduzieren. Als Grenzwert wird zum jetzigen Zeitpunkt, unabhängig davon, ob es sich um traditionelle oder neuartige Dämmstoffe handelt, ein U -Wert

²Hierbei erfolgt eine Aggregation der energetischen Sanierung von einzelnen Bauteilen und Flächen (z. B. Fassade, Fenster, Dach, Keller und Boden) zu Vollsanierungen und die Umrechnung auf die Gebäudefläche.

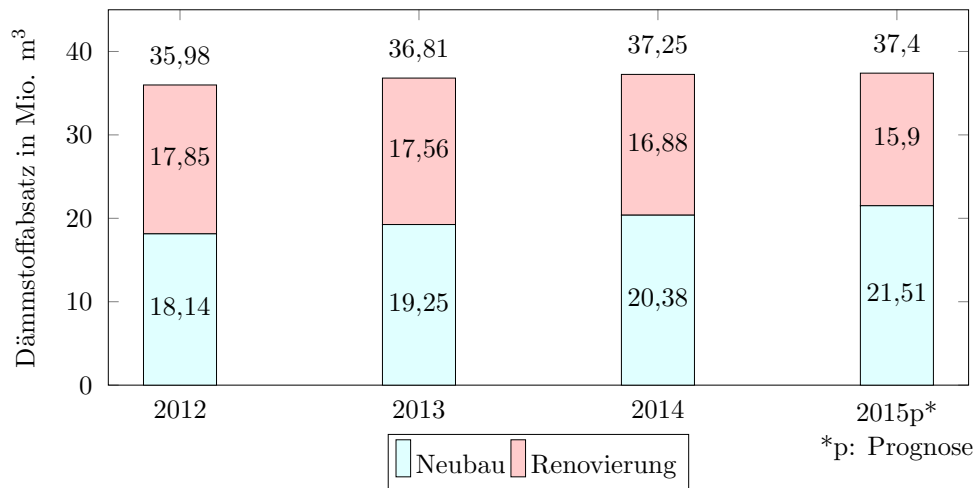


Abbildung 1.2: Zeitliche Entwicklung der Absatzmengen am Dämmstoffmarkt [11].

von $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ angesehen [12]. Dieser Grenzwert wird nicht nur aus technischer Sicht durch z. B. konstruktive, bauphysikalische und geometrische Randbedingungen beeinflusst, sondern auch durch wirtschaftliche, ökobilanzielle und andere Aspekte (z. B. Denkmalschutz) [14]. Abbildung 1.3 zeigt den U -Wert einer Außenwand in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke (δ), welche mit gängigen Dämmstoffen verschiedener Wärmeleitstufen³ (WLS) bzw. mit einem Vakuum-Hochleistungspaneel (VIP) versehen ist. Zudem ist der oben genannte Grenzwert von $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ als gestrichelte Linie dargestellt. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass aufgrund des hyperbelförmigen Verlaufs des U -Werts eine weitere Zunahme der Dämmstoffdicke aufgrund der oben genannten Aspekte insgesamt nicht zwangsläufig zu einer höheren Rentabilität führen muss. Darüber hinaus müssen für die langfristigen energiepolitischen Zielsetzungen nicht nur das Dämmvermögen und die Applikations- und Materialkosten bedacht werden. Herstellungs- und - zukünftig von Bedeutung - Entsorgungskosten müssen für eine ganzheitliche Betrachtung ebenfalls miteinbezogen werden [15]. Aus diesem Grund müssen neben den bisher häufig verwendeten Dämmstoffen auf Basis von geschäumten Kunststoffen bzw. Mineralwollfasern [16] neuartige, innovative und klimafreundliche Hochleistungsdämmmaterialien in den Gebäudebestand Einzug finden, deren Rentabilität nicht nur wirtschaftlich, sondern auch ökologisch ist.

Können aufgrund platzbedingter und / oder baulicher Restriktionen in urbanen Gebieten nur limitierte Dämmstärken realisiert werden, kann unter Umständen nur ein moderater U -Wert die Folge sein, da das vollständige Dämmpotential restriktionsbedingt nicht ausgenutzt werden kann. Durch geschickte Maßnahmen unter Einsatz innovativer Technologien kann trotzdem eine zusätzliche Energieeinsparung durch die Ausnutzung regenerativer Energien, wie z. B. passive Solarenergienutzung, über die ausreichend vorhandenen Fassadenflächen,

³Wärmeleitstufe 040 $\hat{=}$ Wärmeleitfähigkeit $0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, Wärmeleitstufe 035 $\hat{=}$ Wärmeleitfähigkeit $0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, etc.

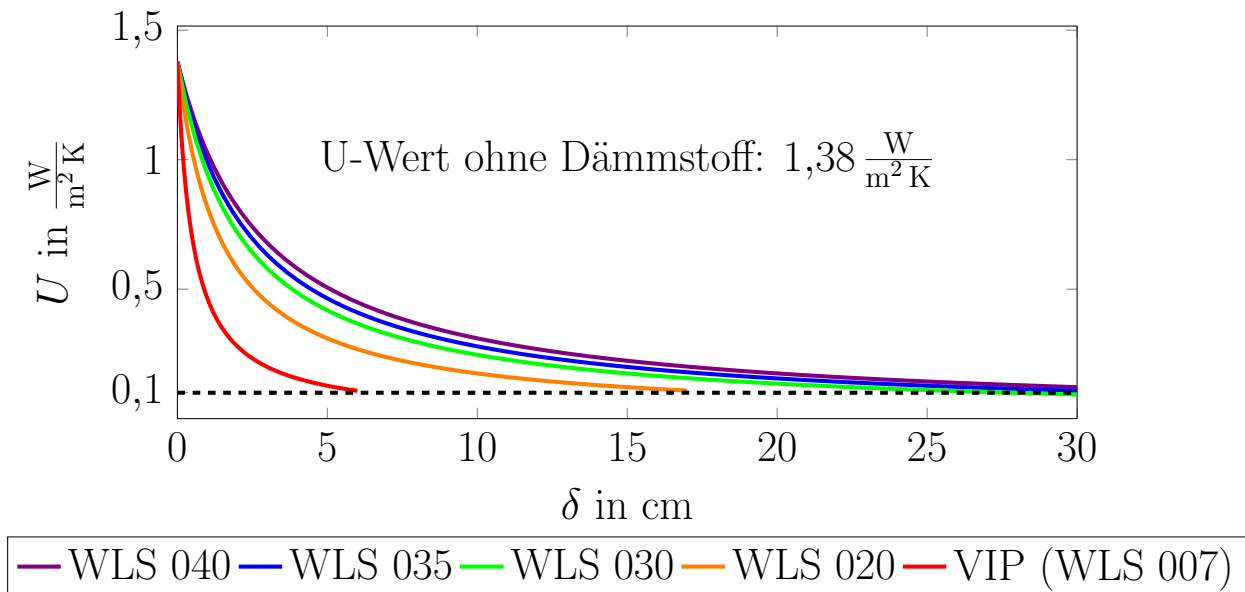


Abbildung 1.3: Beispielhafte Darstellung der Abhängigkeit des U -Werts von einer Wand von der Dämmstoffdicke (δ).

erzielt werden [17]. Derartige solarnutzende Fassadensysteme mit Dämmfunktion („Transparente Wärmedämmsysteme“) sind insbesondere für Gebäude in Massivbauweise aufgrund deren hoher Rohdichte geeignet. Im Winter durchaus erwünscht, kann es im Sommer, bei unzureichendem Sonnenschutz, zu einer Überhitzung des Gebäudes kommen, sodass oftmals aktive Sonnenschutzmechanismen (z. B. Rollläden und Jalousien) zur Vorbeugung angebracht werden müssen [18]. Daher muss bei derartigen Systemen nicht nur das Dämmvermögen, sondern auch das Potential zur Gewinnung solarer Energie und das Risiko einer sommerlichen Überhitzung bekannt sein.

Weitere Nachteile von transparenten Wärmedämmsystemen bzw. -materialien (TWDs), die eine großflächige Verbreitung hemmen, sind in folgender Aufzählung aufgeführt:

- Glasbasierte Wabenstruktur-TWDs sind zerbrechlich und nicht für die Applikation am Gebäude geeignet [19].
- Hohe herstellungsbedingte Schnitttemperaturen verursachen Schmelzvorgänge an den Schnittkanten von kunststoffbasierten TWDs, wodurch die Transparenz gemindert wird [20].
- Der solare Transmissionsgrad von nahezu allen experimentell untersuchten TWDs ist über einen weiten Einstrahlwinkelbereich annähernd konstant [21]. Aus diesem Grund ergeben sich sommerliche Überhitzungsprobleme durch eine immense Solarstrahlungsabsorption, entweder weil eine zu große südorientierte Fläche mit TWDs versehen ist oder weil eine sehr gut wärmespeichernde Wandmasse vorhanden ist [20, 22, 21].

- d) Kunststoffbasierte TWDs stellen eine potentielle Brandlast dar, wenn sie an Fassaden von Hochhäusern angebracht werden [23].
- e) Mechanische Verschattungseinrichtungen, die die unter c) genannten Überhitzungsprobleme verhindern sollen, sind störanfällig und erfordern daher eine häufige und teure Wartung [24, 21].
- f) Die zerbrechliche Struktur von Silica Aerogel basierten TWDs verhindert deren breitere Anwendung. Zudem ist die Herstellung von großen, rissfreien Stücken aus monolithischen Silica Aerogelen nicht ohne Weiteres möglich. Weiterhin war die maximale Größe der TWDs auf 0,6 m x 0,6 m begrenzt. Aus diesen Gründen wurden monolithische, Silica Aerogel-basierte TWDs bisher nur in der Forschung eingesetzt [25].
- g) Entsprechend [26] handelt es sich bei den meisten der auf dem Markt erhältlichen TWDs um Kunststoff- bzw. Glaserzeugnisse. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials, im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmstoffen, deutlich höher ist, was zu erhöhten Wärmeverlusten an sonnenlosen Tagen und in den Nachtstunden führt. Darüber hinaus ist insbesondere das Recycling von kunststoffbasierten TWDs mit einem hohen Aufwand verbunden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Minimierung der oben genannten Nachteile der TWDs geleistet werden. Daher wurde ein neues Konzept zu einem solarselektiven Wärmedämmsystem („SolAr selective Thermal Insulation System“, SATIS) entwickelt, welches in dieser Arbeit vorgestellt wird. Hierbei wurden folgende Zielsetzungen für das SATIS-Konzept definiert:

1. Die Entwicklung eines rein mineralischen, an den jeweiligen Standort angepassten Produkts, welches problemlos recycelbar ist und somit keine zukünftigen Entsorgungsprobleme verursacht.
2. Maximale Solarstrahlungstransmission bei einem definierten Einstrahlwinkel, der typisch für Wintermonate oder die Übergangszeit ist.
3. Eine beträchtliche Reduktion der Solarstrahlungstransmission bei hohen Einstrahlwinkeln zur Vermeidung von Überhitzungsproblemen.
4. Eine mit herkömmlichen Dämmmaterialien (z. B. geschäumte Kunststoffe oder Mineralwolle) vergleichbare effektive Wärmeleitfähigkeit, um an sonnenlosen Tagen oder in den Nachtstunden einen hohen thermischen Widerstand zu gewährleisten.

Zur Erreichung dieser Zielsetzungen wird in dieser Arbeit die hybride, d. h. experimentelle - unter Einsatz eines Prüfstands - und theoretische - mithilfe von Simulationsmodellen -

Untersuchung verschiedener innovativer Dämmsysteme behandelt, wobei der Fokus auf dem neuartigen solarselektiven Wärmedämmsystem liegt. Der in dieser Arbeit durchgeführte Entwicklungsprozess teilt sich in konstruktive (Kapitel 3; Zielsetzung 1), experimentelle (Kapitel 4 und 5; Zielsetzungen 2, 3 und 4) und numerische (Kapitel 4, 6 und 7; Zielsetzungen 2, 3 und 4) Schritte auf.

In den folgenden Absätzen, die zugleich der Gliederung der Kapitel dieser Arbeit entsprechen, werden die wesentlichen zur Erreichung dieser Ziele notwendigen Entwicklungsschritte zusammengefasst.

Kapitel 2 bietet eine umfassende Übersicht über traditionelle, state-of-the-art und neuartige Dämmsysteme. Hierbei werden die gängigsten und vielversprechendsten Materialien beschrieben, die zur Dämmung von Gebäuden eingesetzt werden. Wesentliches Charakteristikum dieser Materialien ist es, eine Erhöhung des thermischen Widerstands der Wandkonstruktion herbeizuführen, um den Transmissionswärmeverlust zu reduzieren. Zudem wird eine detaillierte Übersicht zu Hochleistungswärmedämmputzen und zu den bisherigen Möglichkeiten zur Gewinnung von solarer Energie in Form von Wärme über „transparente Wärmedämmsysteme“ (TWDs) gegeben. Darüber hinaus werden der Nutzen und die Anwendung von in Gebäudefassaden integrierten Phasenwechselmaterialien zur Latentwärmespeicherung ausführlich erörtert. Im Rahmen dieses Themenkomplexes werden die bisherigen Entwicklungen anhand ihres Aufbaus kategorisiert und Einsatzgebiete sowie praktische Applikationen dargestellt. Abschließend wird das in dieser Arbeit entwickelte „solarselektive Wärmedämmsystem“ (SATIS), welches als Grundmaterial einen Hochleistungswärmedämmputz verwendet, vom bisherigen Stand der Technik abgegrenzt.

Der für die messtechnische Untersuchung und zur Schaffung einer experimentellen Datenbasis notwendige Prüfstand wird in Kapitel 3 vorgestellt. Dabei werden zunächst die wesentlichen Komponenten des konzipierten und errichteten Versuchsaufbaus erläutert. Der realisierte Aufbau ermöglicht die stationäre und dynamische Untersuchung von Wandkonstruktionen in Bezug auf den Wärme- und Feuchtetransport, bzw. den Einfluss von winkel- und intensitätsabhängiger Solarstrahlung. Da die Zeitskalen bei Feuchtetransport-Diffusionsprozessen⁴ deutlich größer als beim Wärmetransport sind, wird in dieser Arbeit nur der Wärme- und Solarstrahlungstransport behandelt. Zudem werden die experimentell untersuchten und für die nachfolgenden Kapitel relevanten konventionellen und neuartigen Wandkonstruktionen (WKs) sowie deren schichtweiser Aufbau detailliert beschrieben.

Kapitel 4 behandelt die Ermittlung des Wärmeleitwerts (engl. „thermal conductance“) als stationären Kennwert zur Quantifizierung des Dämmvermögens von Gebäuden. Dieser Kennwert beinhaltet ausschließlich, im Gegensatz zum U -Wert, die thermischen Widerstände

⁴Ein in einem anderen Versuchsaufbau durchgeführter Trocknungsversuch einer mit einem Mikrohohlglaskugel-Wärmedämmputz versehenen Wandkonstruktion hat sich aufgrund der sehr geringen Diffusionskoeffizienten über mehrere Monate erstreckt.

des Wandaufbaus ohne die konvektiven Wärmeübergangswiderstände auf der Wandinnen- und -außenseite. Am Beispiel einer ungedämmten und zwei gedämmten Wandkonstruktionen wird zum einen in Anlehnung an das Standardverfahren der DIN EN 1934 und zum anderen über eine für den Prüfstand neu entwickelte Methodik unter Verwendung eines Parameteridentifikationsverfahrens der stationäre Wärmeleitwert der Wandkonstruktionen ermittelt sowie das neu entwickelte Verfahren verifiziert.

Die Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung des solaren Gewinns von Wandkonstruktionen werden in Kapitel 5 präsentiert. Hierbei wird, neben einem stationären Verfahren zur Ermittlung des g -Werts, ein für den vorliegenden Prüfstand entwickeltes dynamisches Testverfahren vorgestellt, bei dem die WKs unter vorgegebenen Randbedingungen messtechnisch untersucht werden. Weiterhin werden Leistungsindikatoren für das dynamische Verfahren eingeführt, begründet und ermittelt, die quantitative Vergleiche hinsichtlich der solaren Gewinne und der Energiespeicherfähigkeit der WKs ermöglichen.

Kapitel 6 umfasst die numerische Modellbildung der untersuchten Wandkonstruktionen sowie die Validierung der simulativen Ergebnisse mit den experimentellen Prüfstandsmessungen. Die Modelle werden sukzessiv - mit zunehmender Komplexität des Wandaufbaus - erweitert. Darüber hinaus werden die dahinterliegenden physikalischen Vorgänge mathematisch beschrieben. Die Qualität der Übereinstimmung der simulativen und experimentellen Ergebnisse wird mittels definierter Vergleichskenngrößen bewertet und diskutiert.

Das in Kapitel 5 experimentell und in Kapitel 6 numerisch untersuchte solar selektive Wärmedämmsystem wird in Kapitel 7 mittels einer Parameterstudie analysiert. Hierbei werden die für den Aufbau notwendigen konstruktiven Parameter - ausgehend vom hergestellten Prototyp - variiert und der Einfluss auf den Transmissionswärmeverlust und solaren Gewinn ermittelt. Im Anschluss wird eine numerische Untersuchung zur jährlichen Energieeinsparung in der Heizperiode und zum solaren Mehrertrag in Sommermonaten (Überhitzungsrisiko) im Vergleich zu einer herkömmlich gedämmten Wandkonstruktion durchgeführt. Abschließend wird eine entwickelte Methodik auf Basis eines Kennfelds präsentiert und verifiziert, die eine Integration der solaren Eigenschaften des entwickelten solar selektiven Wärmedämmsystems in gängige frei verfügbare und kommerzielle Gebäudesimulationsprogramme ermöglicht.

In Kapitel 8 werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige mögliche Schritte zur Weiterentwicklung des solar selektiven Systems und zur Weiterführung der Arbeit gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die immer höher werdenden Ansprüche an den energetischen Standard von Gebäuden spiegeln sich in den zahlreichen Entwicklungen von Dämmprodukten und -systemen wieder. Neben den klassischen Wärmedämmmaterialien haben auch neue Materialtechnologien, mit zum Teil deutlich verbesserten Wärmedämm- und Speichereigenschaften, Einzug in den Gebäudebereich gefunden. In den folgenden Abschnitten wird zunächst eine typische Klassifizierung von Dämmmaterialien und -systemen vorgestellt. Anschließend erfolgt ein kurzer Überblick über die gängigen konventionellen Dämmmaterialien sowie den aktuellen Dämmzustand von Gebäuden in Deutschland. Im Bereich der neuen Materialtechnologien werden ausgewählte Entwicklungen, deren physikalisches Grundprinzip, Vor- und Nachteile sowie konkrete Umsetzungen detailliert erläutert.

2.1 Klassifizierung von Wärmedämmmaterialien und -systemen

Die hier gewählte Klassifizierung von konventionellen Wärmedämmmaterialien und -systemen, die in Abbildung 2.1 dargestellt ist, erfolgt rohstoffbasiert, d. h. unter Berücksichtigung des Ursprungs der Dämmstoffe [27]. Hierbei können zunächst, abhängig von der Herkunft des Materials, organische und anorganische Rohstoffe unterschieden werden, die wiederum in natürliche und synthetische Dämmmaterialien untergliedert werden können. Bei den natürlichen Materialien bleibt im Wesentlichen der Rohstoff unverändert, obwohl einige dieser Materialien in vergleichsweise großen Mengen Additive wie z. B. Bindemittel, Stützfasern, Imprägnierungen oder Brandschutzmittel enthalten. Liegt dieser Anteil an Zusätzen unterhalb von 25 % [16], können diese Materialien der Gruppe der natürlichen Dämmstoffe zugeordnet werden. Werden die Rohstoffe durch eine spezielle Behandlung in ihrer Zusammensetzung geändert, zählen sie zu den synthetischen Dämmmaterialien.

Abgegrenzt von den konventionellen Wärmedämmmaterialien, und ausgenommen von der oben beschriebenen Klassifizierung, sind neue Materialtechnologien [28, 29] zu nennen, die sich nicht explizit einer Rohstoffbasis zuordnen lassen. Hierbei handelt es sich nicht direkt um Bau(dämm)stoffe, sondern vielmehr um kombinierte, oftmals vorgefertigte Systeme mit spezifischer Funktion. Diese neuartigen Technologien sind ebenfalls in Abbildung 2.1 veranschaulicht.

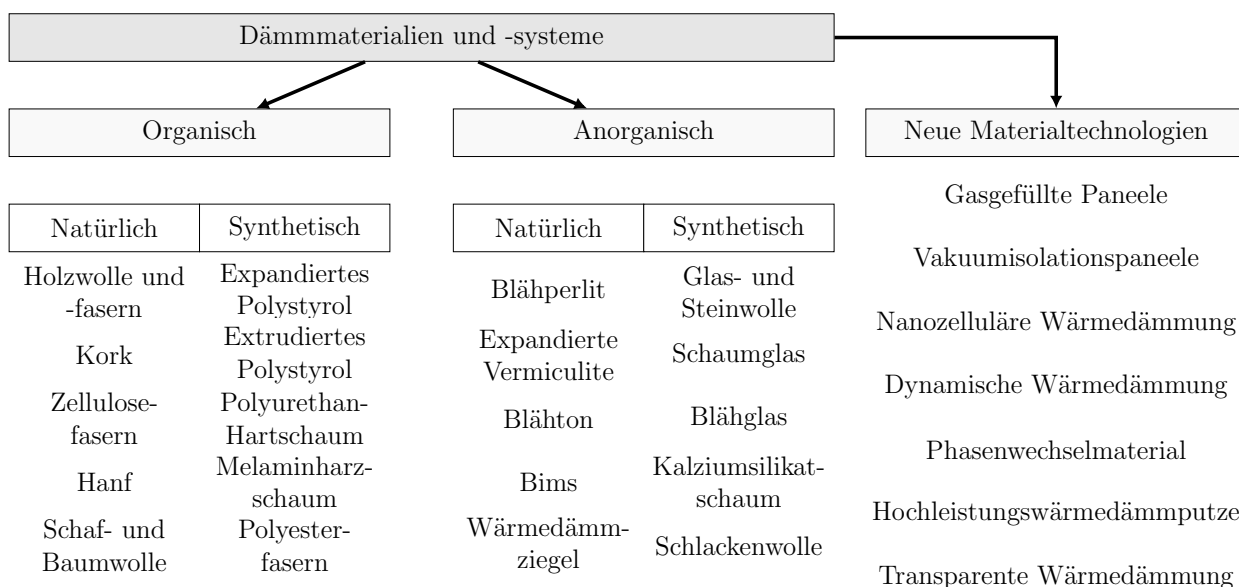


Abbildung 2.1: Konventionelle Wärmedämmmaterialien und neue Materialtechnologien klassifiziert nach [27].

2.2 Konventionelle Wärmedämmmaterialien

Der europäische und deutsche Markt an Dämmmaterialien wird von zwei Gruppen dominiert: Anorganische Materialien auf Basis von Mineralwollfasern und organische geschäumte Kunststoffe [30, 31, 11]. In Abbildung 2.2 ist der relative Anteil gängiger konventioneller Wärmedämmmaterialien an der Gesamtabsatzmenge aus dem Jahr 2014 in Deutschland dargestellt. Glas- und Steinwolle nehmen zusammen einen Anteil von 42,2 %, die polymerbasierten Dämmstoffe von 46,5 % ein, wobei expandiertes Polystyrol (EPS) in dieser Gruppe mit 32,7 % den größten Anteil an den geschäumten Kunststoffen hat. Gemeinsam haben diese beiden Gruppen somit einen Marktanteil von nahezu 90 %. Dies hängt insbesondere mit den geringen Wärmeleitfähigkeiten, d. h. hohen thermischen Widerständen, dieser Materialien sowie den vergleichsweise geringen Kosten zusammen [32]. Zu den weiteren Kriterien für die Dämmstoffauswahl zählen Umweltverträglichkeit (Energie- und Materialverbrauch während der Produktion, Recycling-Eigenschaften und Schadstoffgehalt), Brandverhalten, Halt- und Verarbeitbarkeit, Schalldämmung, Festigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstand [33].

Weiterhin muss nach der konkreten Anwendung der einzelnen Dämmstoffe in verschiedenen Gebäudebereiche (Dach, Decke, Wand und Perimeter) unterschieden werden, da je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Formen der einzelnen Dämmstoffe zur Verfügung stehen. Typischerweise sind Dämmmaterialien in Form von Matten oder Rollen, als Einblas- oder Schüttdämmung, Plattendämmmaterial, Spritzdämmung oder Sprühschaumdämmung erhältlich. Tabelle A.1 listet für gängige konventionelle Wärmedämmmaterialien, unterteilt nach ihrer Form, wesentliche bauphysikalische und gebäuderelevante Kennwerte auf [34, 35].

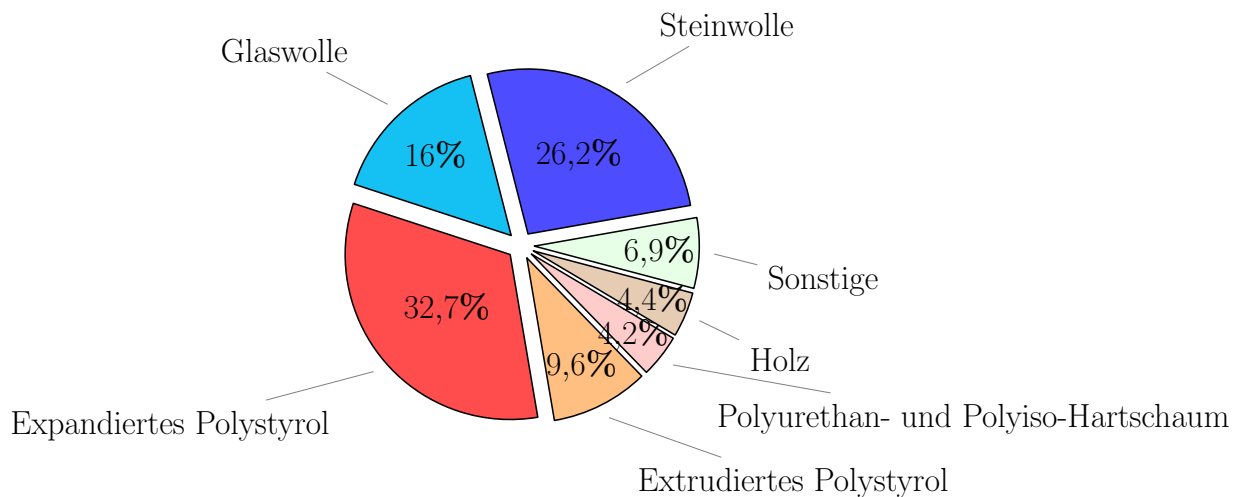


Abbildung 2.2: Relativer Anteil gängiger konventioneller Wärmedämmmaterialien an der Gesamtabsatzmenge im Jahr 2014 in Deutschland [11].

2.3 Neue Materialtechnologien

Zunächst werden im Folgenden gasgefüllte- und Vakuum-Isolations-Paneele präsentiert und deren Weiterentwicklungsmöglichkeiten im Kontext der neuen Materialtechnologien eingeordnet. Als besonders für die energetische Sanierung von Gebäuden geeignet werden Hochleistungswärmedämmputze, bei denen innovative Zuschlagsstoffe das Dämmpotential erheblich steigern, präsentiert. Als Alternative zur ausschließlichen Dämmung werden transparente Wärmedämmsysteme, die neben guten Isolationseigenschaften zusätzliche solare Gewinne ermöglichen, vorgestellt. Anschließend werden Phasenwechselmaterialien als Energiespeichertechnologien im Gebäudebereich präsentiert.

2.3.1 Gasgefüllte- und Vakuum-Isolations-Paneele

Grundsätzlich erhalten viele der hier beschriebenen traditionellen Wärmedämmmaterialien ihre guten Wärmedämmeigenschaften aufgrund eines hohen Anteils an luftgefüllten Zwischenräumen und Poren. Aufbauend auf der Tatsache, dass Gase im Vergleich zu Flüssigkeiten und Festkörpern eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit besitzen, wird bei gasgefüllten Paneelen (GFPs) zur Gebäudedämmung der Ansatz verfolgt, die sich in den Hohlräumen befindende Luft durch noch besser wärmeisolierende Gase zu ersetzen. Hauptaugenmerk liegt auf der Reduktion der Wärmeleitung im Gas, da diese, im Vergleich zur Festkörperwärmeleitung, der Strahlung und der Konvektion, den wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismus darstellt [36]. Tabelle 2.1 listet verschiedene Gase und deren Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 25 °C auf [37]. Insbesondere Edelgasen, wie beispielsweise Argon, Krypton oder Xenon, die aufgrund ihres einatomigen Aufbaus im Vergleich zu Luft eine deutlich geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen, wird ein hohes Potential in der Anwendung für GFPs

zugeschrieben. Edelgase können der Atmosphäre direkt entnommen werden und besitzen daher ein GWP von Null.

GFPs besitzen eine hochdichte, reflektierende Hülle, deren Wirkung bidirektional ist, d. h. es wird eine Unterbindung des Luft- und Feuchtigkeitstransports in das Paneel und ein Austreten des Gases aus dem Paneel angestrebt. Hierbei kommen entweder vakuumbeschichtete Folien (z. B. mit Aluminium) oder Polymere (z. B. Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer, kurz: EVOH) zum Einsatz, deren wichtigstes Qualitätsmerkmal die gasspezifische Gastransmissionsrate ist. Ein Gasverlust von $0,1 \frac{\text{vol}\%}{\text{a}}$ wird als akzeptabel angesehen, was nach 20 Jahren zu einer Luftkonzentration von 2 % führt [36]. Zur Vermeidung interner Konvektionsströmungen und zur Reduktion des Strahlungsaustauschs zwischen den Oberflächen der Paneelhülle sind Zellstrukturen integriert, die oftmals aufgrund des einfachen Herstellungsprozesses hexagonal hergestellt und zudem mit einer Low- ε -Beschichtung versehen sind [36].

Die Zukunft der GFPs wird trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit von Edelgasen in Frage gestellt, da sie im Gegensatz zu Vakuum-Isolations-Paneelen (VIPs) ausschließlich den Vorteil besitzen, dass, aufgrund des nicht vorhandenen Vakuums und der damit einhergehenden fehlenden äußeren atmosphärischen Belastung, kein Stützmaterial benötigt wird. Eine hohe Schadensanfälligkeit bei unsachgemäßem Umgang, eine alterungsbedingte Erhöhung der Gaswärmeleitfähigkeit sowie die fehlende Möglichkeit der In-situ Weiterverarbeitung (z. B. Zuschnitte für Gebäudeanwendungen) sind allerdings bei beiden Technologien vorhanden [29].

Tabelle 2.1: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Gase bei 25 °C [37].

Gas	Luft	Ar	CO ₂	N ₂ O	CF ₄	SF ₆	Kr	Xe
Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{mW}}{\text{mK}}$	26,2	17,8	16,6	16,2	16,0	14,0	9,4	5,6

VIPs, die aufgrund ihrer äußerst geringen Wärmeleitfähigkeit im Bereich von $0,004 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bis $0,008 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [38] zum aktuellen Zeitpunkt als eine der vielversprechendsten Hochleistungs-dämmsysteme gelten, bestehen aus einem mikroporösen Stützkern in einer evakuierten, mehrschichtigen und hochdichten Hülle. Im Gegensatz zur Anwendung traditioneller Wärmedämmmaterialien, deren Wärmeleitfähigkeit um das 5- bis 10-fache höher liegt, kann das Gebäude verschlankt und trotzdem der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden. Auch in Bezug auf die Langzeitstabilität der zu Beginn vorhandenen Wärmeleitfähigkeit des VIP ist nur mit moderaten Anstiegen über Jahrzehnte zu rechnen [39]. In VIPs kommt dem Stützkern eine besondere Bedeutung zu. Dieser muss, zur Herstellung eines Vakuums, offenporig und, idealerweise, nanoporös sein, eine hohe mechanische Festigkeit bei möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit gewährleisten und eine möglichst hohe Opazität hinsichtlich Infrarotstrahlung aufweisen [40]. Auf dem Markt stehen einige offenzellige organische und

anorganische Materialien für den Einsatz als Stützkern zur Verfügung. Pyrogene Kieselsäure eignet sich an dieser Stelle besonders gut [41]. Dies hängt insbesondere mit der hohen Porosität und geringen Porengröße dieses Materials zusammen, wodurch auch die Gaswärmeleitfähigkeit in VIPs, die wie bei GFPs den stärksten Einfluss unter den vorhandenen Wärmetransportmechanismen besitzt, entscheidend beeinflusst wird.

Im theoretisch perfekten Vakuum liegt eine Gaswärmeleitfähigkeit von Null vor. Allerdings hat auch bereits ein gegenüber der Atmosphäre reduzierter Gasdruck, im Zusammenspiel mit einer verminderten Porengröße des Materials, in dem sich das Gas befindet, einen Einfluss auf die Reduktion der Gaswärmeleitfähigkeit innerhalb der Poren des Stützmaterials [40]. Diese Tatsache wird durch den Knudsen-Effekt beschrieben. Das bedeutet, dass sobald die mittlere freie Weglänge des Gases (σ_{mean}) die Größenordnung der Poren des umgebenden Materials (δ_P) einnimmt, die Luftmoleküle öfter mit den Oberflächen des Materials als mit anderen Teilchen zusammenstoßen. Quantitativ wird dieses Phänomen durch die Knudsen-Zahl (Kn), die in Gleichung (2.1) definiert ist, beschrieben. Ist $Kn \gg 1$, tritt die Knudsen-Diffusion auf.

$$Kn = \frac{\sigma_{\text{mean}}}{\delta_P} \quad (2.1)$$

Die mittlere freie Weglänge wird anhand von Gleichung (2.2) bestimmt.

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_K^2 p} \quad (2.2)$$

Hierbei bezeichnet k_B die Boltzmann-Konstante ($1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$) [42], T die Temperatur, d_K den Gasmolekül-Kollisionsdurchmesser und p den Gasdruck. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.1) und (2.2) kann die Gaswärmeleitfähigkeit in den Poren (λ_{gas}) mittels Gleichung (2.3) ermittelt werden [29].

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_{\text{gas},0}}{1 + 2\beta Kn} = \frac{\lambda_{\text{gas},0}}{1 + \frac{\sqrt{2}\beta k_B T}{\pi d_K^2 p \delta_P}} \quad (2.3)$$

Hierin bezeichnet $\lambda_{\text{gas},0}$ die Wärmeleitfähigkeit des Gases unter STP⁵-Bedingungen und β eine gas-, temperatur- und materialabhängige Konstante zwischen den Zahlenwerten 1,5 und 2, die die Effizienz der Energieübertragung zwischen Gas und Materialoberflächen beschreibt.

Abbildung 2.3 veranschaulicht die Wärmeleitfähigkeit von Luft (λ_{gas}) als Funktion des Gasdrucks (p) für verschiedene Porendurchmesser (δ_P). Hierbei zeigt sich, dass insbesondere mikro- und nanoporiges Material als Stützmaterial für VIPs geeignet ist, da bereits für Feinvakuum ($\approx 100 \text{ Pa}$ [43]) Gaswärmeleitfähigkeiten von $0 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ entsprechend Gleichung (2.3) berechnet werden. Durch die Reduktion des Porendurchmessers kann zudem die Qualität

⁵Standard Ambient Temperature and Pressure.

des Vakuums reduziert werden, was sich positiv auf die Beanspruchung des Stützmaterials sowie den Luft- und Feuchtigkeitstransport, aufgrund der reduzierten Triebkraft durch die hochdichte Hülle, auswirkt.

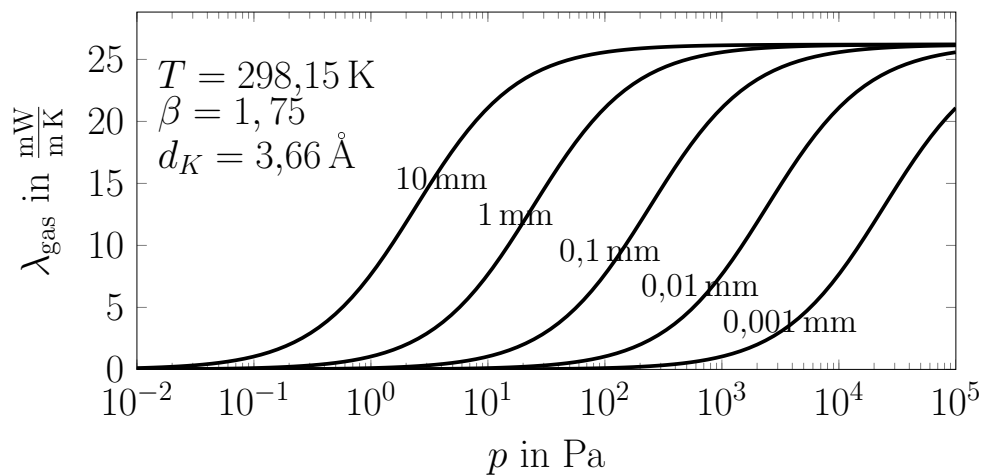


Abbildung 2.3: Wärmeleitfähigkeit von Luft (λ_{gas}) als Funktion des Gasdrucks (p) für verschiedene Porendurchmesser (δ_P) entsprechend Gleichung (2.3) mit relevanten Materialkenngrößen aus [42].

Mögliche zukünftige Entwicklungen sehen aufgrund der Vielzahl an Nachteilen von GFPs und VIPs (hohe Schadensanfälligkeit, Alterung, fehlende In-Situ Bearbeitbarkeit) ein hohes Potential in der Entwicklung von offen- und / oder geschlossenzelligen gasgefüllten- und Vakuum-Isolations-Materialien (GFMs und VIMs) [29]. Hierbei nutzen VIMs weiterhin die Vorteile der Knudsen-Diffusion aus, jedoch benötigen diese Materialien keine äußere Hülle mehr. Der Knudsen-Effekt würde dabei bereits bei der Herstellung der geschlossenzelligen Mikro- und Nanoporen vorliegen. Diese Poren würden beispielsweise während des Abkühlungsprozesses ein internes Vakuum erzeugen [29]. Zudem ermöglicht die Struktur dieses Materials eine Weiterverarbeitung und Anpassung, da Eingriffe in diese Struktur nur lokal auf wenige Poren beschränkt sind und sich nicht global auf das Vakuum auswirken.

2.3.2 Hochleistungswärmedämmputze

Das zunehmende ökologische Bewusstsein der Gesellschaft, welches sich in einer wachsenden Nachfrage nach Produkten natürlichen Ursprungs widerspiegelt, sowie die im Laufe der Jahre immer strikter werdenden Regularien der EnEV hinsichtlich des Dämmstandards von Gebäuden haben das Interesse sowohl von Herstellern als auch Verbrauchern an rein mineralischen Baustoffen zur Innen- und Außendämmung geweckt. Aus diesem Grund wurden daher vermehrt Wärmedämmputze⁶ zur energetischen Sanierung von Gebäuden eingesetzt

⁶DIN EN 998-1 definiert Wärmedämmputze als Putzmörtel mit einer maximalen Wärmeleitfähigkeit von $0,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [44].

[45, 46, 32]. Bei diesen Putzen, die eine ähnlich einfache Verarbeitbarkeit wie herkömmliche Putze aufweisen [47], handelt es sich in der Regel um diffusionsoffene poröse Mörtel, die Kalk oder Zement als Bindemittel zur Gewährleistung einer ausreichenden mechanischen Stabilität beinhalten. Da klassische Bindemittel (z. B. Zement) bei ihrer Herstellung einen enormen Energieverbrauch aufweisen [48], wird an weniger energieintensiven Bindemitteln, wie beispielsweise Metakaolin oder feingemahlener Flugasche geforscht, da diese ein hohes Potential hinsichtlich der hygrothermischen und mechanischen Eigenschaften versprechen [49, 50]. Wärmedämmputze weisen eine hohe Porosität auf, wodurch die Wärmeleitfähigkeit gegenüber herkömmlichen Mörteln reduziert werden kann. Um den thermischen Widerstand weiter zu steigern, werden dem Dämmputz anorganische bzw. organische Leichtzuschläge beigemischt. Verwendet man keramische Materialien als Additive, erhält man rein mineralische Wärmedämmputze, wodurch Probleme bei der zukünftigen Entsorgung vermieden werden können. Typische Leichtzuschläge in Dämmputzen sind EPS, Perlite, Vermiculite oder auch Kork [51, 47, 45].

Betrachtet man allerdings zum heutigen Zeitpunkt die Wärmeleitfähigkeit dieser herkömmlichen Dämmputze mit den oben genannten Leichtzuschlägen, bewegt sich diese, entsprechend einer Studie zu den marktverfügbaren Wärmedämmputzen in Europa [52], im Bereich von $0,055 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bis $0,200 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, was deutlich über der Wärmeleitfähigkeit gängiger traditioneller Wärmedämmstoffe wie EPS und Steinwolle ($0,038 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $0,037 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, vgl. Tabelle A.1) liegt. Abbildung 2.4 veranschaulicht die Wärmeleitfähigkeit herkömmlicher zement- (P1-P8) und natürlich-hydraulisch kalkbasierter (P9-P14) Wärmedämmputze. Eine produktspezifische Bewertung war kein Ziel dieser Studie. Daher wurden keine weiteren Details zu Hersteller, Produkt oder Leichtzuschlag angegeben. Weiterhin zeigt Abbildung 2.4 beispielhaft die Wärmeleitfähigkeit von EPS ($0,038 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$), die deutlich geringer ausfällt als die der Wärmedämmputze.

Der Vergleich dieser Dämmputze mit EPS hebt den Bedarf an höchstwärmedämmenden Alternativen, deren Wärmeleitfähigkeit auf oder unter dem Niveau von EPS liegt, hervor. Das erste Produkt, welches die Wärmeleitfähigkeit von mit herkömmlichen Leichtzuschlägen versetzten Putzen deutlich unterschreitet, ist der seit dem Jahr 2014 auf dem europäischen Markt erhältliche, mit granularem Aerogel versetzte Hochleistungswärmedämmputz (HLWDP) „HASIT Fixit 222“ (vgl. Abbildung 2.4 „AG“, $\lambda_B^7 = 0,030 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, $\lambda_D^8 = 0,028 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [53, 55]).

Aerogele, die vornehmlich durch überkritische Trocknung mittels Sol-Gel-Prozess [56] hergestellt werden, haben eine Porosität von bis zu 99 % und einen Porendurchmesser in der Größenordnung von 10 nm bis 100 nm [57]. Die hierdurch bedingte Ausnutzung des Knudsen-Effekts (vgl. Abschnitt 2.3.1) ermöglicht niedrige Wärmeleitfähigkeiten ($<0,02 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

⁷Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit.

⁸Nennwert der Wärmeleitfähigkeit.

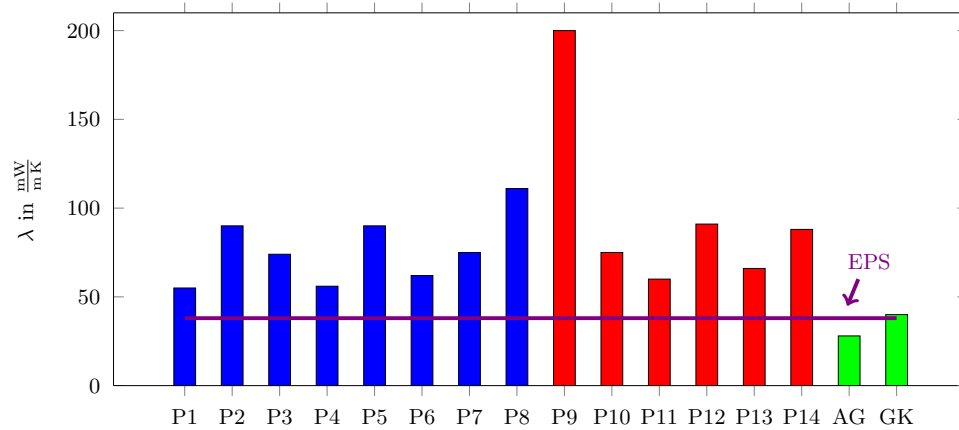


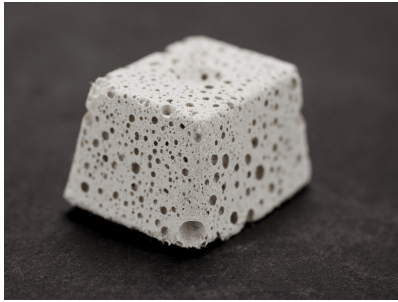
Abbildung 2.4: Wärmeleitfähigkeit (λ) herkömmlicher (Leichtzuschlag in Form von EPS, Perlit o. Ä.) zement- (P1-P8) und natürlich-hydraulisch kalkbasierter (P9-P14) Wärmedämmputze [52] im Vergleich zu neuartigen Hochleistungswärmedämmputzen (AG [53] und GK [54]). Als Vergleichswert ist die Wärmeleitfähigkeit einer EPS-Platte (vgl. Tabelle A.1) dargestellt.

[56]) und begründet den Einsatz als gebäudeintegrierten Dämmstoff [58]. Durch den hohen Transmissionsgrad im Bereich des sichtbaren Lichts [59] finden Aerogele ebenfalls Anwendung in hochisolierenden Fenstern [60]. Eine weitläufige Verbreitung im Bausektor wird allerdings durch die derzeit hohen Kosten und die geringe mechanische Festigkeit gehemmt [61].

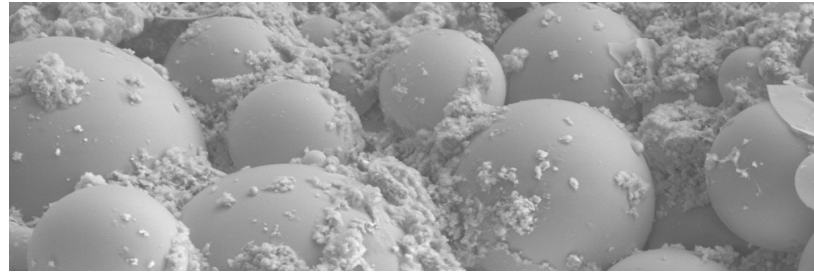
Neben dem in Abbildung 2.5a dargestellten HLWDP Fixit 222, dessen gutes thermisches Dämmvermögen bereits in den letzten Jahren in experimentellen Langzeitstudien untersucht wurde [46, 62, 63], sind mittlerweile weitere Hochleistungswärmedämmputze auf Aerogelbasis wie XERAL SP 028⁹ (Leichtzuschläge: Aerogel und Perlit) [64] oder HECK AERO iP WA [65] auf dem Markt verfügbar, welche Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_B = 0,028 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $\lambda_B = 0,040 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ aufweisen.

Als Alternative zu den hochwärmedämmenden Aerogelen als Zuschlagsstoff wurde 2019 das rein mineralische ecosphere-Dämmsystem auf Basis von Mikrohohlglaskugeln in den Markt eingeführt [54, 66]. Durch das herstellungsbedingte partielle Vakuum innerhalb der in einer Zementmatrix eingebundenen Mikrohohlglaskugeln (MHGK), die in Abbildung 2.5b dargestellt sind, sowie der hohen Porosität des Gesamtsystems, ergibt sich eine, gegenüber herkömmlichen Wärmedämmputzen, deutlich reduzierte Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abbildung 2.4 „GK“, $\lambda_B = 0,042 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, $\lambda_D = 0,040 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [54]). Der Anteil an Mikrohohlglaskugeln im Wärmedämmputz beträgt dabei über 80 vol% [66].

⁹Früher: Interbran Premium Dämmputz 028.



(a) Aerogel Hochleistungswärmedämmputz HASIT Fixit 222. Abbildung entnommen aus [67].



(b) In eine Zementmatrix eingebundene Mikrohohlglaskugeln des ecosphere-Dämmsystems (maxit eco 72) von maxit Deutschland. Abbildung entnommen aus [68].

Abbildung 2.5: Hochleistungswärmedämmputze mit innovativen Leichtzuschlägen.

2.3.3 Transparente Wärmedämmsysteme

Die bisher in den Abschnitten 2.3.1 (GFPs und VIPs) und 2.3.2 (HLWDPs) beschriebenen, neuartigen Materialtechnologien zielen zur Heiz- und Kühlenergieeinsparung am Gebäude ausschließlich auf die Reduktion des Wärmeverlusts durch die Gebäudehülle ab. Eine weitere Verringerung des Wärmeverlusts durch diese Materialien bedingt, dass die Wärmeleitfähigkeit in zukünftigen Entwicklungen immer weiter reduziert werden kann, sodass hierdurch der thermische Widerstand erhöht wird. Allerdings ist die effektive Wärmeleitfähigkeit von beispielsweise VIPs mittlerweile derart gering, dass kaum signifikante Verbesserungen der Dämmleistung möglich sind (vgl. Abschnitt 2.3.1 VIPs mit einer Wärmeleitfähigkeit $0,004 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$).

Als Alternative zu diesen opaken Wärmedämmsystemen, die ausschließlich eine Reduktion der Transmissionswärmeverluste bewirken, stehen für verschiedene Anwendungen geeignete transparente Wärmedämmsysteme¹⁰ (TWDs) zur Verfügung. TWDs zeichnen sich durch eine gute Wärmedämmung bei gleichzeitig hoher Lichttransmission aus. Die wesentlichen Einsatzgebiete derartiger Systeme umfassen Kollektoren zur Prozesswärmeerzeugung, Speicherkollektoren zur Brauchwassererwärmung, thermische Langzeitspeicher, Tageslichtsysteme und Systeme zur Raumwärmegewinnung über Fassaden oder Dächer [21, 18]. Beim Einsatz von TWDs als passive Fassadenheizsysteme können nicht nur die entsprechenden Transmissionswärmeverluste durch die Fassade kompensiert, sondern zusätzlich solare Gewinne erzielt werden, die beispielsweise andere Energieverluste (Lüftung, Fenster o. Ä.) decken. Zudem können Feuchteschäden im Mauerwerk durch den Wärmeeintrag beseitigt werden, was zur

¹⁰Die für dieses System eingesetzten Materialien streuen genau genommen mehr oder weniger das einfallende Licht, weshalb der physikalisch korrekte Begriff „transluzente Wärmedämmung“ (lichtdurchlässige aber undurchsichtige Wärmedämmung) lautet. Im allgemeinen Sprachgebrauch hat sich allerdings der Ausdruck „transparente Wärmedämmung“ durchgesetzt, wodurch die hohe Lichttransmission der Materialien hervorgehoben wird.

Erhaltung der Bausubstanz beiträgt. Weiterhin erhöht die in den Innenraum geleitete Wärmemenge die Wandinnentemperatur, wodurch die Lufttemperatur zur Heizenergieeinsparung gesenkt werden kann, ohne auf ein gleichbleibend behagliches Raumklima verzichten zu müssen [18].

Abbildung 2.6 zeigt schematisch das Funktionsprinzip der transparenten Wärmedämmung und dessen wesentliche Komponenten am Beispiel der passiven Fassadenheizung. Hierbei wird die außenseitig auf die Fassade auftreffende Solarstrahlung durch die TWD geleitet und von einer Absorberfläche aufgenommen. Die absorbierte Wärme wird anschließend in der bestehenden Wandkonstruktion gespeichert, wobei sich eine Massivwand, aufgrund der hohen Wärmekapazität, sehr gut für TWDs eignet [69]. Die Wärme wird daraufhin durch Wärmeleitung in Richtung der Rauminnenseite transportiert. Hierdurch steigt das Temperaturniveau innerhalb der gesamten Wandkonstruktion, was ebenfalls in einer erhöhten Wandinnentemperatur resultiert. Durch die reduzierte Temperaturdifferenz zwischen Wand und Innenluft wird der Transmissionswärmeverlust reduziert bzw., falls die Wandinnentemperatur die Lufttemperatur übersteigt, ein Wärmegewinn herbeigeführt. Als weitere Komponente wird oftmals eine mechanische Verschattung oder Zwangsbelüftung für TWDs vorgesehen, um die sommerliche Überhitzung zu vermeiden, die ein erhebliches Problem dieser Systeme darstellt [22, 70, 21].

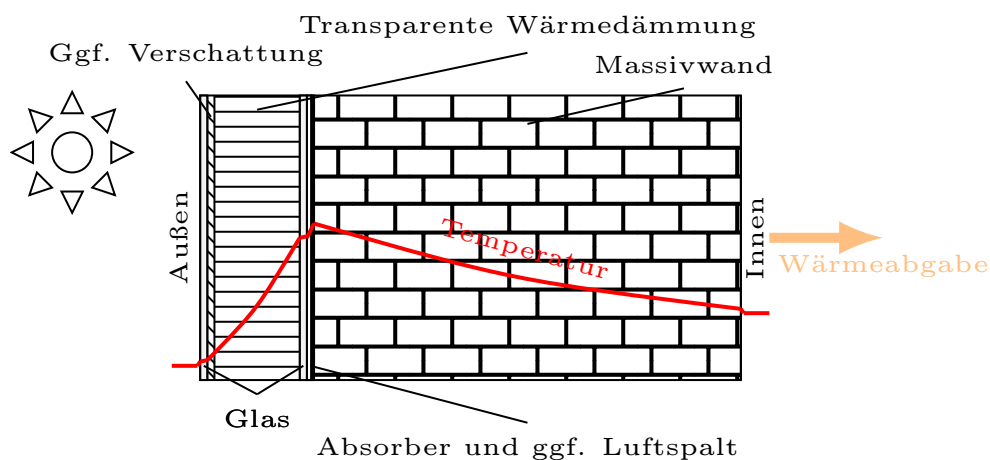


Abbildung 2.6: Funktionsprinzip der transparenten Wärmedämmung. Reproduziert aus [18].

Neben den guten Dämmeigenschaften der TWD spielt auch die Transmission von Solarstrahlung zur passiven Energienutzung eine wesentliche Rolle. Hinsichtlich der Klassifizierung der verschiedenen transparenten Wärmedämmsysteme, die auch maßgeblich deren Transmissions-eigenschaften beeinflusst, werden vier generische Gruppen entsprechend ihres geometrischen Aufbaus unterschieden [26, 21]. Abbildung 2.7 zeigt diese geometrische Klassifizierung der transparenten Wärmedämmmaterialien sowie die hierfür verfügbaren Materialien.

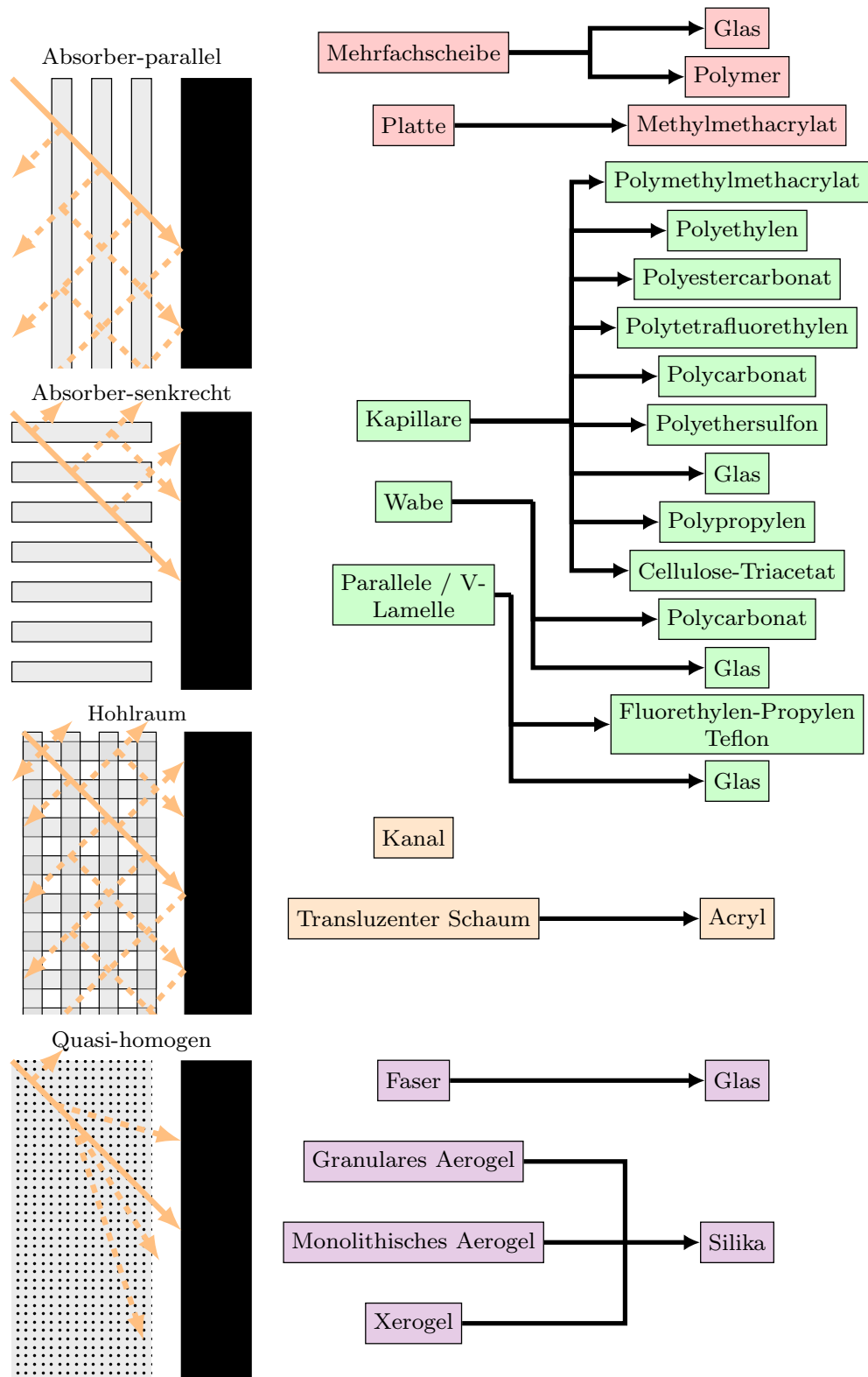


Abbildung 2.7: Geometrische Klassifizierung von transparenten Wärmedämmmaterialien mit einer Übersicht über die für die jeweilige Herstellung verwendeten Materialien [21, 26, 19].

Man unterscheidet grundsätzlich absorber-parallele, absorber-senkrechte, Hohlraum- und quasi-homogene Strukturen [26]. Die Gruppe der absorber-parallelen Strukturen besteht aus einer oder mehrerer Glas- oder Polymerplatten, die parallel zum Absorber angeordnet sind. Nachteile dieser Anordnung sind die durch den entsprechenden Hohlraum in höherem Maße auftretenden Konvektions- und Strahlungswärmeverluste sowie das Vorhandensein eines Pareto-effizienten Zustands. Eine Erhöhung der Plattenzahl führt zwar zur Reduktion der Wärmeverluste, gleichzeitig wird aber auch der solare Gewinn durch die Mehrfachreflektionen geschmälert.

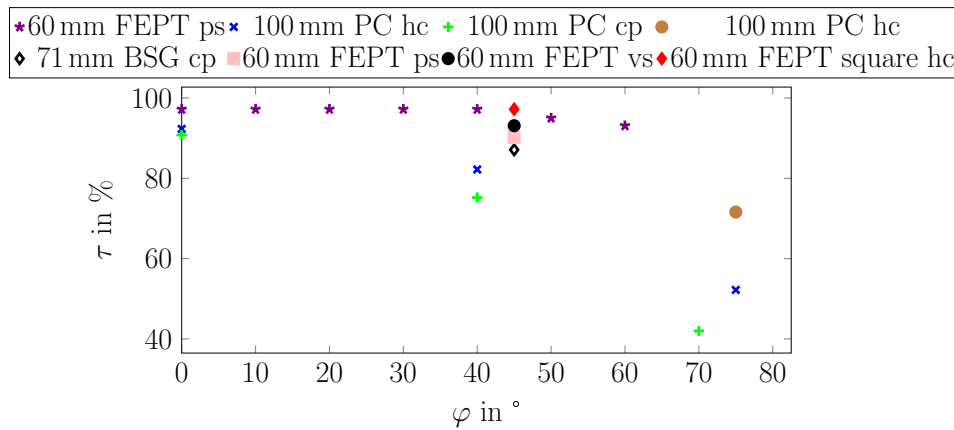
Zur absorber-senkrechten Anordnung gehören Kapillar- und Wabenstrukturen sowie parallele bzw. V-förmige Lamellen. Die am besten dokumentierte Anordnung ist die Wabenstruktur, die auch in vielen natürlichen und von Menschen geschaffenen Applikationen Anwendung findet [19]. Bei dieser Gruppe wird bei geeignetem Seitenverhältnis der Struktur die natürliche Konvektion durch die Aufteilung in offene, absorber-senkrechte Hohlkammern verringert und es erfolgt eine vorwärts gerichtete Reflexion zum Absorber mit geringen Strahlungsverlusten, weshalb insbesondere diese Variante gegenüber absorber-parallelen Strukturen bevorzugt wird [21]. Ein Nachteil ist die Festkörperwärmeleitung im Glas, die aber bei entsprechend geringer Wandstärke ausreichend reduziert werden kann [71].

Die Gruppe der Hohlraum-Strukturen erhält man durch Kombination der absorber-parallelen und absorber-senkrechten Anordnung. Hierzu zählen beispielsweise Kanäle oder transluzente Schäume mit Blasen in der Größenordnung von Millimetern [71]. Diese Geometrien können die konvektiven Wärmeverluste äußerst wirksam unterdrücken, allerdings fällt der Transmissionsgrad aufgrund erhöhter Reflektionen geringer aus [26].

In der Gruppe der quasi-homogenen Strukturen konzentriert sich die Entwicklung im Bereich der TWD-Materialien insbesondere auf Systeme mit Silika-Aerogel [60, 72]. Aufgrund der bemerkenswerten Kombination aus hoher Lichtdurchlässigkeit und geringer Wärmeleitfähigkeit gestaltet sich die Anwendung derartiger Systeme in hochisolierenden Fenstern besonders interessant [73].

Für die experimentelle Ermittlung des direkt-diffusen Transmissionsgrads, welcher ein Maß zur Bestimmung der solaren Gewinne durch das transparente Wärmedämmmaterial (TIM) ist, werden bei absorber-senkrechten Strukturen unter anderem Ulbrichtkugeln eingesetzt [71]. Diese befinden sich oftmals auf rotierenden Trägerscheiben, um Untersuchungen hinsichtlich der Winkelabhängigkeit des Transmissionsgrads durchzuführen. Zur Erfassung der transmittierten Solarstrahlung wird beispielsweise ein Spektrophotometer eingesetzt [70, 74]. Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft die in Studien [75, 76, 77, 78] experimentell ermittelten winkelabhängigen Transmissionsgrade (τ) verschiedener Strukturen von TIMs.

Die Untersuchungen zeigen, dass im Winkelbereich von 0° bis 60° hohe Transmissionsgrade in der Größenordnung von 90 % auftreten, was mit guter Übereinstimmung durch verschiedenste mathematische Modelle wiedergegeben werden kann [21, 76, 79]. Erst bei höheren



FEPT: Fluorethylen-Propylen Teflon; PC: Polycarbonat; BSG: Borosilikatglas
hc: Wabenstruktur; ps: Parallele Lamelle; vs: V-Lamelle; cp: Kapillare

Abbildung 2.8: Experimentell ermittelter Transmissionsgrad (τ) von transparenten Wärmedämmmaterialien in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel (φ). Darstellung in Anlehnung an [21] mit Daten aus [75, 76, 77, 78].

Einstrahlwinkeln erfolgt eine signifikante Reduktion des Transmissionsgrads.

Neben dem Transmissionsgrad spielt auch der Gesamtenergiedurchlassgrad (g -Wert), d. h. die direkt transmittierte Strahlungsleistung zusammen mit der sekundären Wärmeabgabe nach innen durch Abstrahlung und Konvektion, eine wesentliche Rolle. Für komplexe Verglasungen wie TIMs, bei denen die Berechnung des g -Werts durch Verfahren aus z. B. der DIN EN 410 [80] nicht mehr möglich ist, können kalorimetrische Messverfahren mittels einer gekühlten Absorberplatte („Cooled plate method“) bzw. einer gekühlten Box („Cooled box method“) angewandt werden [81].

Im Projekt ALTSET („Angular-dependent Light and Total Solar Energy Transmittance for Complex Glazings“) wurde für komplexe Verglasungen ein Verfahren zur Ermittlung des winkelabhängigen g -Werts unter Verwendung von Standardbedingungen vorgeschlagen [82]. In [83] wird eine Methodik unter Verwendung von g -Wert-Messungen bei vier Einstrahlwinkeln (0° , 30° , 45° und 60°) zur Ermittlung monatlicher effektiver g -Werte angeführt. Diese g -Werte sollen beispielsweise im Monatsverfahren nach DIN 4108-6 [84] zur Ermittlung der solaren Gewinne verwendet werden. Die Ermittlung dieses monatlichen effektiven g -Werts aus [83] ist auch in die Richtlinie des Fachverbands „Transparente Wärmedämmung e.V.“ eingeflossen [69].

Die zweite wesentliche Kenngröße von transparenten Wärmedämmmaterialien ist der U -Wert. Für die Messung des Gesamtwärmetransports innerhalb von TIMs kann beispielsweise eine Heizplattenapparatur verwendet werden [74, 85]. Zur separaten Untersuchung der natürlichen Konvektion innerhalb der Strukturen bietet es sich an, dass die Apparatur um verschiedene Winkel bis hin zu 180° (heiße Platte oben, d. h. keine Konvektion) neigbar ist. Durch Differenzrechnung kann somit der Konvektionseinfluss verschiedener Winkelstellungen

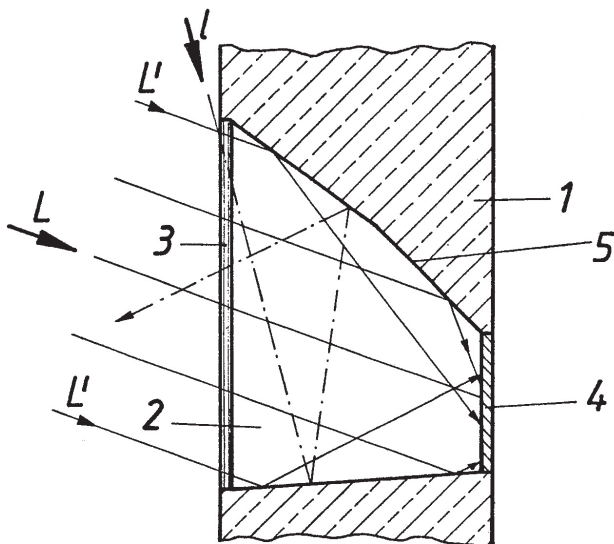
gegenüber der 180° Neigung ermittelt werden [71].

Aufgrund des geringen Wärmeschutzes der in den 1950er Jahren eingeführten ungedämmten Trombe-Wand [86] als Vorläufer der transparenten Wärmedämmung sind neben den beschriebenen Grundlagenuntersuchungen zum Strahlungs- und Wärmetransport in transparenten Wärmedämmmaterialien im gleichen Zeitraum (1980er Jahre) drei wesentliche Patentschriften zur Applikation von „Energie- bzw. Solarfassaden“ an Gebäuden entstanden [87, 88, 89], die hier vollständigkeithalber erwähnt werden sollen, da sie durch die Teildämmung bereits eine Verbesserung gegenüber der ungedämmten Trombe-Wand aufweisen. Aufgrund ähnlicher Merkmale und Ausführungen von [89] und [87] wird ausschließlich ersteres, welches zeitlich zuerst offengelegt wurde, vorgestellt. Abbildung 2.9a zeigt die Prinzipskizze des Patents AT 375125 B: „Fassadenverkleidung für sonnenseitige Gebäudewände“, bestehend aus wärmedämmenden Platten (1) sowie beidseitig abgedeckten, nach außen erweiternden Kanälen (2) mit wärmeisolierendem Verschluss (3) und reflektierender Schicht (5). Innenseitig befindet sich eine lichtabsorbierende bzw. lichtdurchlässige Abdeckung (4). Die Geometrie der lichtleitenden Kanäle ist so ausgeführt, dass die Solarstrahlung für geringe Einstrahlwinkel (L bzw. L') zum Absorber geleitet und für hohe Einstrahlwinkel (1) reflektiert wird [89].

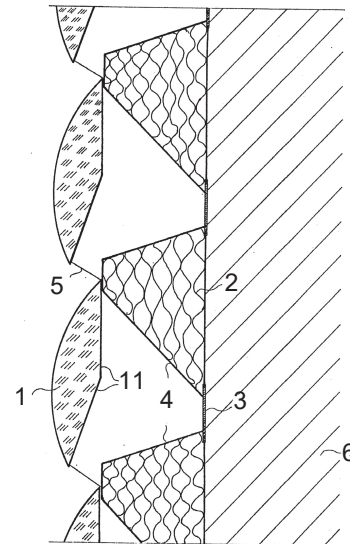
Abbildung 2.9b veranschaulicht die Prinzipskizze aus DE 3210238 A1: „Energiefassade als Vorsatzschale für massive tragende und nicht tragende Außenwände“, bestehend aus einer trapezförmigen, nach außen verjüngenden Dämmschicht (2), aufgebracht auf einer Massivwand (6), deren innenseitige Flächen (4) reflektierend ausgeführt sind. Optische Linsen (1) aus Glas mit innenseitiger Verspiegelung (11) und einer Abschlussblende (5) zur Anbindung an die Dämmung leiten das gebündelte Licht auf die Absorberflächen (3). Auch hier erfolgt je nach Einfallswinkel eine Selektion der Solarstrahlung [88].

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung von transparenten Wärmedämmmaterialien, hat ab der Jahrtausendwende der Anteil an Studien zu homogenen Materialien und Applikationen im Gebäudebereich stark zugenommen [26]. Dies ist insbesondere auf die Möglichkeit zur gleichzeitigen Bereitstellung von Tageslicht und Dämmung sowie auf die sinkenden Kosten des Dämmmaterials zurückzuführen. Zuvor waren absorber-senkrechte Strukturen, aufgrund ihres besseren Dämmvermögens bei geringeren Kosten, sowie die Applikation von TIMs in Solarkollektoren vornehmlich Gegenstand zahlreicher Studien [26]. Zum heutigen Zeitpunkt existiert eine Vielzahl an transparenten Wärmedämmmaterialien auf dem Markt, wobei die meisten Hersteller Polycarbonat bzw. Aerogel als Grundmaterial verwenden. Eine umfangreiche Auflistung verschiedener Hersteller transparenter Wärmedämmmaterialien und der verwendeten Strukturen ist in Tabelle A.2 zu finden.

Abbildung 2.10a zeigt den U -Wert und Abbildung 2.10b den g -Wert von am Markt verfügbaren TWD-Systemen [26]. Aufgrund der in den vergangenen Jahren zunehmenden Beliebtheit von Aerogel in quasi-homogenen TWD-Systemen werden die am Markt verfügbaren Systeme in „Ohne Aerogel“ und „Mit Aerogel“ unterteilt. Wird Aerogel als transparentes



(a) Prinzipskizze AT 375125 B Fassadenverkleidung für sonnenseitige Gebäudewände. Abbildung entnommen aus [89].



(b) Prinzipskizze DE 3210238 A1 Energiefassade als Vorsatzschale für massive tragende und nicht tragende Außenwände. Abbildung entnommen aus [88].

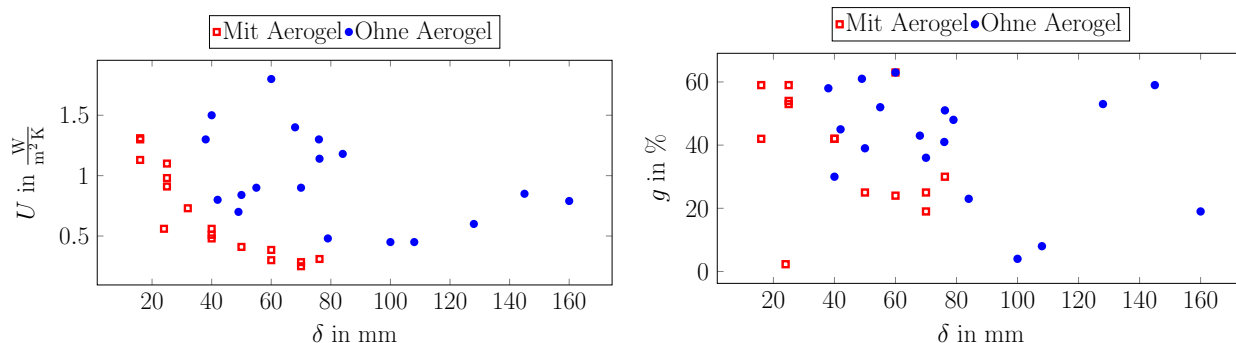
Abbildung 2.9: Prinzipskizzen von Patentschriften für transparente Wärmedämmsysteme.

Wärmedämmmaterial verwendet, können bereits bei geringeren Dicken des Gesamtsystems (60 mm bis 80 mm) U -Werte in der Größenordnung von $0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ bis $0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ erreicht werden, die deutlich unterhalb der U -Werte von TWD-Systemen ohne Aerogel gleicher Schichtstärke liegen. In vielen Systemen wird granulares Aerogel der Cabot Corporation (Lumira® [90]) eingesetzt, welches das einfallende Licht diffus streut, weshalb die zugehörigen g -Werte, entsprechend Abbildung 2.10b, mit zunehmender Dicke (60 mm bis 80 mm) etwas geringer als die g -Werte vergleichbarer TWD-Systeme ohne Aerogel sind.

Abbildung 2.11a zeigt beispielhaft das von der Sto AG¹¹ entwickelte transparente Wärmedämmsystem StoTherm Solar¹². Es handelt sich hierbei um ein TWD-System mit einer putzartigen Oberfläche. Zur Installation wird StoTherm Solar auf das bestehende Mauerwerk geklebt und fugenlos an das umgebende herkömmliche Wärmedämmverbundsystem angeschlossen. Als transparentes Wärmedämmmaterial wird eine Polycarbonat-Kapillarplatte (Kapillardurchmesser von 2 mm [91]) eingesetzt, auf deren Rückseite sich die Absorberfläche befindet. Vorderseitig lässt der mit 2 mm bis 3 mm dicken Glaskügelchen versehene, sich auf einem Vlies befindende, transparente Putz, das Sonnenlicht, abhängig vom Sonnenstand, in die Dämmplatte eindringen [92, 93]. Laut Hersteller beträgt die Wärmeleitfähigkeit des Systems $\lambda_D = 0,09 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [94]. Es stehen Schichtstärken im Bereich von 85 mm bis 145 mm mit U -Werten von $1,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ bis $0,85 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ [26] zur Verfügung. Obwohl in der Heizperiode durchaus

¹¹2014 erfolgte der Wechsel der Rechtsform zu SE & Co. KGaA.

¹²Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit wurde der Verkauf des Systems StoTherm Solar bereits eingestellt.



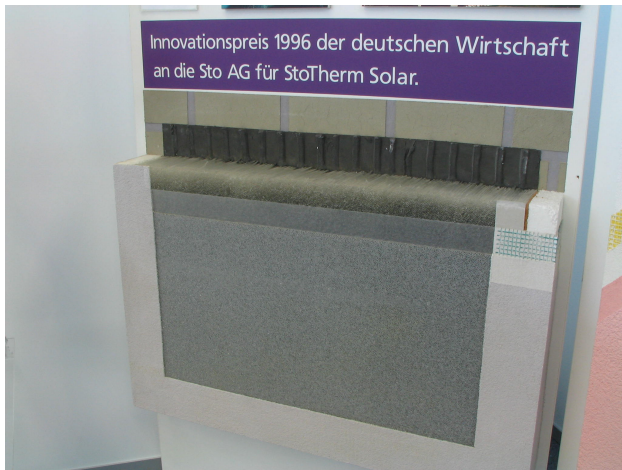
(a) U -Wert gegenüber der Dicke verschiedener TWD-Systeme. (b) g -Wert gegenüber der Dicke verschiedener TWD-Systeme.

Abbildung 2.10: U - und g -Wert von am Markt verfügbaren transparenten Wärmedämmsystemen mit und ohne Aerogel [26].

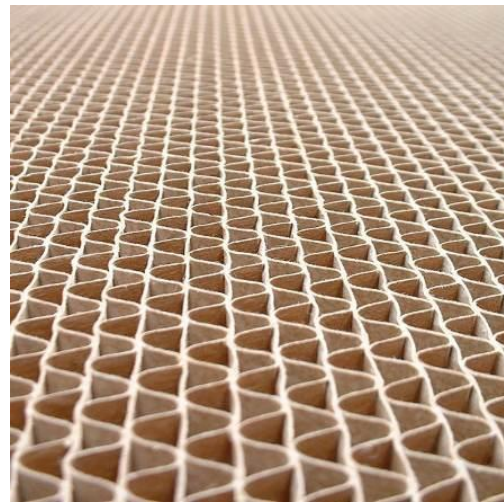
solare Gewinne erzielt werden können, erfolgt die jahreszeitliche Selektion der Solarstrahlung nicht im gewünschten Maße, weshalb es auch im Sommer zu einem vermehrten Wärmeeintrag kommt [91, 92].

Als Alternative zu den oftmals verwendeten kunststoff- oder glasbasierten transparenten Wärmedämmmaterialien setzt die GAP solutions GmbH auf die in Abbildung 2.11b dargestellte, aus Karton bestehende Solarwabe, welche in ein Paneel integriert ist. Das Paneel (84 mm) besteht aus einem ESG-Floatglas (6 mm), einem belüfteten Luftspalt (29 mm), der Solarwabe (30 mm) und einer Trägerplatte (19 mm), wodurch ein U -Wert von $1,18 \frac{W}{m^2 K}$ [95, 26] und ein g -Wert von 23% erreicht wird. Die im Winter bei niedrigem Sonnenstand in die Waben eindringende Solarstrahlung führt zu einem Temperaturanstieg innerhalb des TWD-Systems, wodurch der Wärmeverlust reduziert werden kann. Im Sommer wird laut Hersteller die Überhitzung durch Eigenverschattung aufgrund des hohen Sonnenstands reduziert.

Obwohl das Konzept der gleichzeitig stattfindenden Wärmedämmung und solaren Energienutzung durchaus ein hohes Potential zur Reduktion des Heizwärmebedarfs aufweist [26, 20, 97], haben transparente Wärmedämmmaterialien wesentliche Nachteile, die ihre weitläufige Verbreitung hemmen. Reale dünnzellige, kunststoffbasierte transparente Wärmedämmmaterialien sind oftmals weit entfernt von den in Simulationen getroffenen, idealisierten Annahmen. In der Realität existieren schiefe Zellen, gebrochene oder unregelmäßige Zellkanten sowie inhomogene Zellgrößen, -durchmesser oder -dicken, was gegenüber der Simulation zu geringeren gemessenen Transmissionsgraden führt [76]. Darüber hinaus sind aus Glas gefertigte Wabenstrukturen aufgrund der Zerbrechlichkeit für die Gebäudefassade ungeeignet [19, 21]. Hinsichtlich des zulässigen Temperaturbereichs von kunststoff- und glasbasierten transparenten Wärmedämmmaterialien ist ersterer auf Temperaturen bis i. d. R. $80^\circ C$ beschränkt, was den Einsatz für Solarkollektoren mit höheren Stagnationstemperaturen



(a) Schichtaufbau StoTherm Solar. Abbildung entnommen aus [96].



(b) GAP solution GmbH Solarwabe (GAP:skin). Abbildung entnommen aus [95].

Abbildung 2.11: Beispielhafte Darstellung ausgewählter, marktverfügbarer transparenter Wärmedämmsysteme für Fassaden ohne Aerogel.

(200 °C bis 300 °C) nicht möglich macht. Darüber hinaus müssen bei der Applikation von kunststoffbasierten Materialien an Gebäuden brandschutztechnische Aspekte berücksichtigt werden [23, 21]. Ein weiteres Hemmnis sind hohe Investitionskosten für transparente Wärmedämmmaterialien. Zudem werden im Gebäudebereich für TWDs oftmals teure, wartungsintensive und zum Teil mechanische Verschattungseinrichtungen (z. B. Überstände [98], Jalousien, Rolladen, Prismenglas [99]) benötigt, die die bereits hohen Kosten weiter steigern [24]. Auch die sommerliche Überhitzung an Südfassaden bei einer zu großen Fläche an transparentem Wärmedämmmaterial stellt ein Problem bei derartigen Systemen dar [21]. Bei der Anwendung von Aerogel als TIM spielt, insbesondere bei monolithischem Aerogel, die Zerbrechlichkeit eine große Rolle. Granuläres Aerogel ist hinsichtlich mechanischer Belastungen weniger empfindlich und kann daher leichter in verschiedene Applikationen integriert werden, allerdings ist der Transmissionsgrad geringer als bei monolithischem Aerogel [25].

2.3.4 Phasenwechselmaterialien

Neben der ausschließlichen Dämmung von Gebäuden, d. h. der Reduktion des Wärmeverlusts durch die Erhöhung des thermischen Widerstands, besitzt auch die adäquate und zeitlich entkoppelte thermische Energiespeicherung im Gebäude- und Industriesektor ein hohes Potential für Energieeinsparungen [100, 101]. Das wesentliche Ziel beim Einsatz derartiger Speichertechnologien ist der zeitliche Ausgleich von Energieerzeugung und -verbrauch, um sowohl den Heiz- als auch den Kühlbedarf zu senken. Betrachtet man die Gebäudehülle, stehen dort mit den Wänden, Decken und Böden große Flächen zur Verfügung, die sich für

den Einsatz von integrierten thermischen Energiespeicherkomponenten eignen.

Bei sensibel wärmespeichernden Technologien erfolgt der Speichereffekt über die Temperaturerhöhung in einem festen oder flüssigen Material. Neben Wasser, welches am häufigsten eingesetzt wird, werden auch Keramiken (Zement, Beton), Gestein (Marmor, Granit, Ton, Sandstein) und Polymere (PUR, PS, PVC) oftmals eingesetzt [102]. Phasenwechselmaterialien (PCMs) hingegen nutzen die Phasenumwandlungsenthalpie bei der Änderung des Aggregatzustands zur latenten Energiespeicherung. Gegenüber sensibel wärmespeichernden Technologien haben PCMs den großen Vorteil, dass sie ein deutlich geringeres Volumen einnehmen, um die gleiche Energiemenge zu speichern [103, 104]. Im Fall der Fest-Flüssig-Phasenumwandlung erfolgt das Aufschmelzen des Materials endotherm, d. h. die Energie wird bei nahezu konstanter Temperatur zugeführt und beim Erstarren wieder abgegeben (exotherm).

Im Bereich der latenten Energiespeicherung wurden durch vermehrte Forschung in den letzten Jahren eine Vielzahl an Phasenwechselmaterialien untersucht [105]. Abbildung 2.12 zeigt verschiedene organische und anorganische Phasenwechselmaterialien, die einen weiten Bereich an Schmelztemperaturen (T_S) und -wärmen (h_S) abdecken. Für die Auswahl eines geeigneten Phasenwechselmaterials müssen neben den grundlegenden Anforderungen, d. h. eine hohe Schmelzwärme und eine für die Applikation passende Phasenwechseltemperatur, weitere physikalische, technische und ökonomische Anforderungen an das Material berücksichtigt werden. Tabelle 2.2 listet entsprechend [106, 104] präferierte Anforderungen an Phasenwechselmaterialien auf.

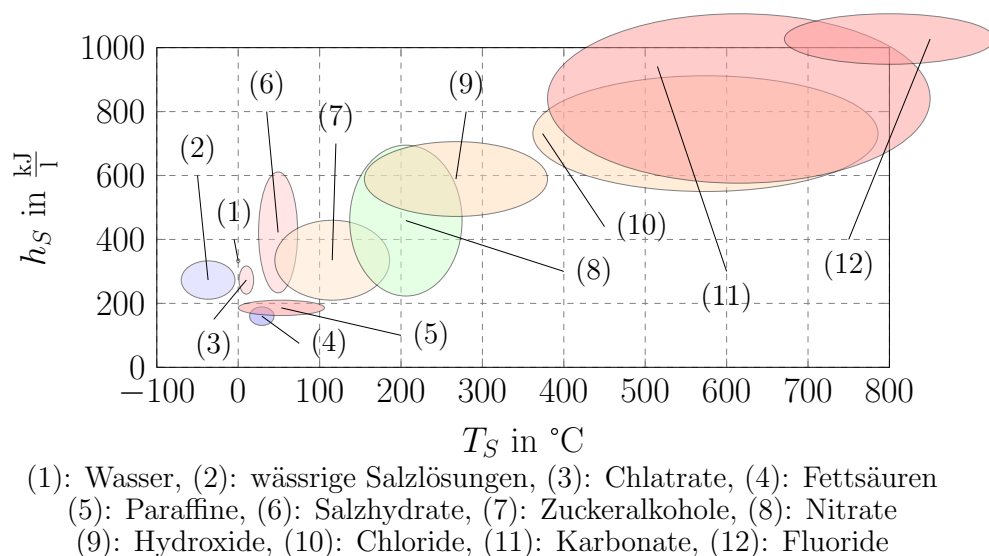


Abbildung 2.12: Schmelztemperaturen (T_S) und -wärmen (h_S) verschiedener Phasenwechselmaterialien. Reproduziert aus [105].

Anorganische Materialien decken einen weiten Bereich an Phasenwechseltemperaturen und Schmelzwärmen ab (vgl. Abbildung 2.12). Hierzu zählen Wasser bei 0 °C, wässrige

Tabelle 2.2: Physikalische, technische und ökonomische Anforderungen an Phasenwechselmaterialien [106, 104].

Anforderung	Beschreibung / Begründung
Physikalische Anforderungen	
1. Applikationsgeeignete Phasenwechseltemperatur	1. Ein- und Ausspeicherung der Energie in einem für die Applikation relevanten Temperaturbereich
2. Hohe Schmelzwärme und spezifische Wärmekapazität	2. Hohe Speicherdichte im Vergleich zu sensibler Wärmespeicherung
3. Hohe Wärmeleitfähigkeit	3. Schnelle Ein- und Ausspeicherung der Energie
4. Zyklenstabilität	4. Mehrmalige Reproduktion des Phasenwechsels ohne Verschlechterung
5. Verminderte Unterkühlung	5. Schmelzen und Erstarren des PCMs bei gleicher Temperatur
Technische Anforderungen	
1. Geringer Dampfdruck	1. Reduktion der Anforderungen an die mechanische Stabilität des PCM-Behälters
2. Geringe Volumenausdehnung	2. Reduktion der Anforderungen an die mechanische Stabilität des PCM-Behälters
3. Chemische und physikalische Stabilität	3. Gewährleistung einer langen Haltbarkeit / Nutzungsdauer
4. Verträglichkeit mit anderen Materialien	4. Lange Haltbarkeit des Behälters im Falle von Leckage / Korrosionsfreiheit
Ökonomische Anforderungen	
1. Geringer Preis	1. Konkurrenzfähig gegenüber anderen Applikationen zur Energiespeicherung
2. Keine Toxizität	2. Umwelt- und Sicherheitsbestimmungen
3. Rezyklierbarkeit	3. Umweltverträglichkeit und ökonomische Gründe

Salzlösungen bei unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Salzhydrate im Bereich von $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ und weitere Salze bei Schmelztemperaturen über $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aufgrund der höheren Dichte ($> 1\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) haben anorganische Materialien im Vergleich zu organischen PCMs eine höhere volumenspezifische Schmelzwärme und sind zudem nicht brennbar [107, 104]. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass u. U. Probleme bei der Materialverträglichkeit zwischen einzelnen Salzen und Metallen auftreten (Korrosion) und es möglicherweise zu einer Unterkühlung und / oder Phasentrennung kommen kann [106].

Organische Materialien nehmen hingegen nur einen kleineren Temperaturbereich von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein. Zu dieser Gruppe gehören Paraffine, Fettsäuren und Zuckeralkohole. In den meisten Fällen ist die Dichte dieser Materialien geringer als $1\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, weshalb sie für gewöhnlich geringere volumenspezifische Schmelzwärmen als anorganische Materialien aufweisen. Organische Materialien sind in der Regel teurer, zeigen aber dafür keinen Unterkühlungseffekt. Die Wärmeleitfähigkeit organischer PCMs ($\approx 0,2\frac{\text{W}}{\text{mK}}$) ist jedoch geringer als bei anorganischen ($\approx 0,5\frac{\text{W}}{\text{mK}}$), was das Ein- und Ausspeichern von Wärme beschränkt [106]. Zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von PCMs können beispielsweise PCM-Graphit-Verbundmaterialien eingesetzt werden. Graphit-Schäume, welche aufgrund ihrer äußerst hohen Wärmeleitfähigkeit und Porosität eine geeignete Matrix für PCMs darstellen, können somit die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu reinem PCM um ein Vielfaches erhöhen [108].

Bei der Integration von PCMs in den Wohnraum begrenzende Bauelemente (Wände, Decken, Böden und Fenster), die sich aufgrund ihrer großer Oberflächen hierfür besonders eignen, ist das wesentliche Ziel die Kontrolle und Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Raumlufttemperatur. Um beispielsweise bei sommerlichen Temperaturen und hoher Solarstrahlungsintensität einer Überhitzung entgegenzuwirken und dementsprechend anfallende zusätzliche Kühllasten zu vermindern, können PCMs in verschiedene Gebäudeelemente und -materialien integriert werden [109, 110]. Durch den zusätzlichen thermischen Energiespeicher, der sich insbesondere bei Wandkonstruktionen in Leichtbauweise aufgrund der geringen thermischen Masse bemerkbar macht [111], wird ein reduzierter Anteil an Wärme durch Wärmeleitung zur Wandinnenseite transportiert und konvektiv an die Rauminnenluft übertragen [112]. Die Applikation von Materialien mit integrierten PCMs führt nicht nur dazu, dass die maximalen Temperaturamplituden gedämpft werden, sondern auch dazu, dass ein zeitlicher Versatz erfolgt, der mehrere Stunden betragen kann und somit das Maximum der Innenlufttemperatur in die Abend- und Nachtstunden verschiebt [113]. Die nächtlich abgegebene Wärme kann somit zu einer Temperaturstabilisierung beitragen und die thermische Behaglichkeit erhöhen. Ganzheitlich betrachtet können durch die verbesserte thermische Speicherfähigkeit, die durch den Einbau von PCMs erzielt wird, leichtere und dünnere Gebäudehüllen entworfen und konstruiert werden.

Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft den Verlauf der Innenlufttemperatur mit und ohne PCM und die daraus resultierende Reduktion und zeitliche Verschiebung der maximalen

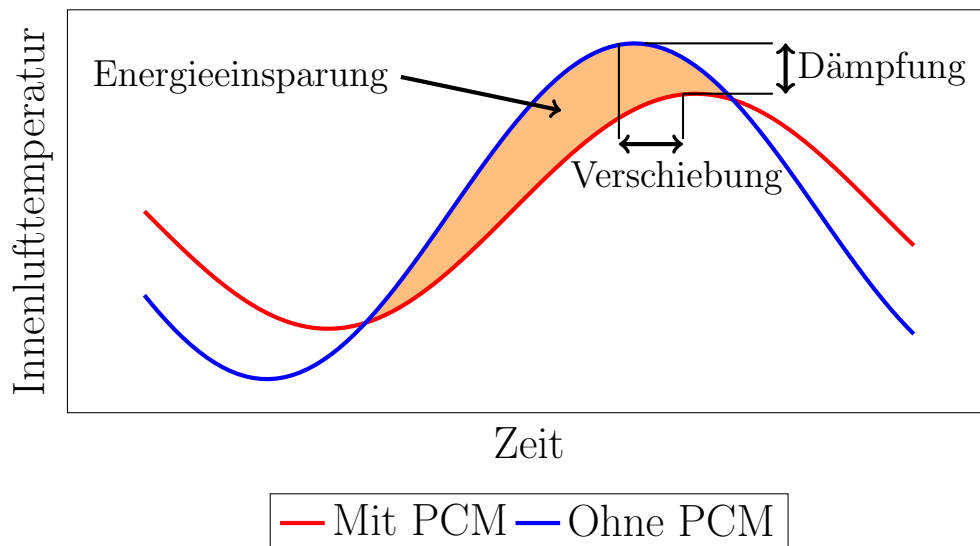


Abbildung 2.13: Beispielhafte Darstellung einer zeitlichen Verschiebung und Dämpfung der maximalen Innenlufttemperatur sowie der resultierenden Kühlenergieeinsparung durch den Einsatz von PCMs.

Innenlufttemperatur sowie die eingesparte Kühlenergie. Je nachdem, um welches PCM es sich handelt, in welcher Menge es zum Einsatz kommt und in welcher Lage (z. B. Position in der Wandkonstruktion [114]) es sich befindet, kann die in Abbildung 2.13 dargestellte Dämpfung bzw. Verschiebung beeinflusst werden.

Das PCM kann über verschiedene Arten in den Baukörper integriert werden. Dabei nimmt die Variante der Direkteinbringung, d. h. die Einbindung in den Baustoff ohne äußere Umhüllung des PCMs, zum heutigen Zeitpunkt im Gebäudebereich aufgrund des potentiellen Austretens der flüssigen Phase, des Ausgasens flüchtiger Bestandteile und „Fogging“¹³ einen geringeren Stellenwert gegenüber verkapselten Varianten ein [107]. Bei der Direkteinbringung wird beispielsweise durch Eintauchen des Baumaterials das PCM durch die Kapillarwirkung des porösen Materials absorbiert. Gipskartonplatten, die mit Paraffin getränkt werden, können z. B. bis zu 30 wt% des PCMs aufnehmen [109]. Auch Ziegelsteine oder Betonblöcke können durch dieses Verfahren behandelt werden. Die größten Vorteile der Direkteinbringung sind die gegenüber der verkapselten Variante höhere Wirtschaftlichkeit und die Einfachheit des Verfahrens, da keine zusätzlichen Geräte benötigt werden [115].

Bei der Makroverkapselung werden größere Behälter (> 10 mm) eingesetzt. Dabei wird das PCM in Kugeln, Platten, Beutel oder Rohre eingeschlossen, die direkt als Wärmeübertrager eingesetzt oder in andere Elemente integriert werden können [106]. Hierbei ergeben sich allerdings nach [107] folgende Nachteile:

1. Die Herstellung und, vor allem, die Einbringung der PCMs sind mit einem hohen Aufwand verbunden, da beispielsweise bei der In-Situ-Installation am Einbringungsort

¹³ „Fogging“ beschreibt die Schwärzung von Wänden aufgrund der Verbindung von VOCs mit Staubpartikeln.

nur ein geringer Automatisierungsgrad möglich ist. Dies resultiert in höheren Kosten.

2. Aufgrund der größeren Abmessungen besteht die Gefahr der Beschädigung der äußeren Hülle, die sowohl bei erstmaliger Installation als auch während des Betriebs gegeben ist, weshalb von Bohren und Nageln an Wänden mit eingebrachten makroverkapselten PCMs abgesehen werden sollte.
3. Größere Verkapselungen können dazu führen, dass bei der Wärmefreisetzung durch Erstarren der Wärmestrom gehemmt wird, da aufgrund des Erstarrungsbeginns an den Kapselwänden ein thermischer Widerstand zur Mitte der Kapsel hin aufgebaut wird. Die Erstarrungszeit und Energiefreisetzungsrate wird hierbei von der Größe und Form¹⁴ der Verkapselung beeinflusst.

Werden deutlich kleinere Behältnisse (< 1 mm) eingesetzt, spricht man von mikroverkapselten PCMs, die die oben genannten Nachteile der Direkteinbringung und Makroverkapselung umgehen. Das PCM kann bei dieser Variante, unabhängig vom momentanen Aggregatzustand, dem Baustoff bereits bei der Herstellung als Additiv beigemischt werden, was sich positiv auf die Kosten auswirkt. Aufgrund der geringen Abmessungen der mikroverkapselten PCMs sind diese nahezu unempfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, sodass der Baustoff wie gewöhnliches Baumaterial bearbeitet werden kann [115]. Das PCM Micronal®, welches von der Firma BASF entwickelt wurde¹⁵, ist in einer Vielzahl an Baumaterialien und -komponenten verarbeitet. Bei diesem PCM handelt es sich um Paraffin-Kügelchen, die mit einer extrem widerstandsfähigen Polymerschicht überzogen sind. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Produkt entweder als Dispersion oder trockenes Pulver mit zwei verschiedenen Phasenwechseltemperaturen und Schmelzwärmen erhältlich: 28 °C und $150\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ bzw. 24 °C und $105\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ [117]. In den Abbildungen 2.14a (PCM Smartboard™, rund $330\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ bei 15 mm Plattendicke), 2.14b (maxit clima, rund $250\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ bei 15 mm Schichtstärke) und 2.14c (Alba®balance, rund $300\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ bei 25 mm Plattendicke) sind PCM-Bauelemente dargestellt, in die das Produkt Micronal® mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen integriert ist [105, 118].

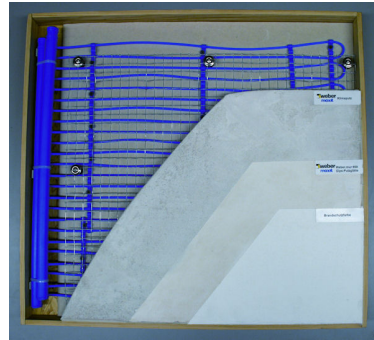
Eine weitere Methode der Verkapselung stellen die formstabilen PCMs dar, bei denen ein Trägermaterial, wie beispielsweise High Density Polyethylen (HDPE), mit einem PCM, wie Paraffin, compoundingiert wird [115, 119]. Beide Materialien werden in flüssiger Form fein miteinander vermischt und anschließend bis zur Erstarrung abgekühlt. Die resultierende Mischung kann, unabhängig davon, ob das eingebettete PCM in flüssiger oder fester Phase vorliegt, ihre Form und mechanische Beständigkeit beibehalten, solange die Temperatur unter dem Schmelzpunkt des unterstützenden Polymers liegt. Der Anteil an Paraffin kann bis zu 80 wt% betragen, sodass die Energiespeicherfähigkeit mit der von herkömmlichen PCMs

¹⁴Eine mathematische Betrachtung für verschiedene Geometrien (Platte, Zylinder und Kugel) ist in [116] dargestellt.

¹⁵2017 hat BASF das Micronal®-Geschäft an Microtek Laboratories Inc. verkauft.



(a) Gipsbauplatte von Knauf mit rund 30 wt% mikroverkapseltem PCM.



(b) Gipsinnenputz von maxit Deutschland mit rund 20 wt% mikroverkapseltem PCM.



(c) Vollgipsplatte von Saint-Gobain Rigips mit rund 13 wt% mikroverkapseltem PCM.

Abbildung 2.14: Typische Anwendungen von PCM-integrierten Bauelementen in Wandkonstruktionen. Abbildungen entnommen aus [105, 118].

vergleichbar ist [120]. Ein typisches Beispiel ist die in Abbildung 2.15 dargestellte PCM-Platte DuPont™ Energain® mit einer Dicke von 5 mm, in der 60 wt% Paraffin in eine Polymermatrix (Ethylen) zwischen zwei 100 µm Aluminiumfolien eingebettet ist [115]. Der Schmelzpunkt liegt bei 21,7 °C, die Energiespeicherfähigkeit bei $515 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ (18 °C bis 24 °C) [121]. Eine Erhöhung der Speicherkapazität kann durch Überlagern mehrere Paneele erreicht werden. Die Platten können beispielsweise an Trenn- und Innenwänden, Decken oder Außenwänden (innenseitig) angebracht werden. Hierbei werden sie in der Regel hinter gewöhnlichen Gipskartonplatten montiert.



Abbildung 2.15: PCM-Verbundplatte DuPont™ Energain® mit einem PCM-Anteil von 60 wt%. Abbildung entnommen aus [105].

PCM-Applikationen stehen nicht nur für Wandkonstruktionen, sondern für eine Vielzahl an Bereichen in der Gebäudehülle zur Verfügung. Hierzu zählen Anwendungen in Fußböden, Decken, Dächern, Dachböden und Fenstern. Weiterführende Informationen über bisherige Entwicklungen in diesen Bereichen können [109, 115] entnommen werden.

2.4 Abgrenzung der eigenen Arbeit

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit soll der präsentierte Stand der Wissenschaft und Technik in mehrfacher Hinsicht ergänzt werden. In Bezug auf die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen, solarnutzenden Wärmedämmkonzepts wird der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte und seit kurzem auf dem Markt verfügbare, rein mineralische Wärmedämmputz mit Mikrohohlglaskugeln (MHGK) als Basis für ein neuartiges, solarselektives Wärmedämmsystem (SATIS) eingesetzt, welches die Vorteile der hohen Dämmwirkung des Putzes mit den solaren Gewinnen der transparenten Wärmedämmsysteme (vgl. Abschnitt 2.3.3) vereinen soll.

In Abgrenzung zu den bisherigen Strukturen und transparenten Wärmedämmmaterialien (vgl. Abbildung 2.7) bzw. den patentierten Solar- und Energiefassaden (vgl. Abbildungen 2.9a und 2.9b) soll das neue solarselektive System die wesentlichen Nachteile hinsichtlich der komplexen Strukturen und des Überhitzungspotentials, welches sich bei der Anwendung in Gebäudefassaden, aufgrund eines in einem großen Winkelbereich hohen Transmissionsgrads (vgl. Abbildung 2.8) ergibt, überwinden. Hierzu wird zum einen, abweichend von der bisherigen Klassifizierung nach Abbildung 2.7, ein Aufbau durch winkelanpassbare, lichtleitende Elemente in Kapillarform realisiert, der eine standortspezifische Auslegung des Systems ermöglicht. Zum anderen wird anstatt eines oftmals einzelnen Materials (z. B. Kunststoff, Glas oder Aerogel, vgl. Tabelle A.2) eine Kombination zweier Materialien, dem MHGK-Wärmedämmputz und Glaselementen, angewandt. Dies ermöglicht die Aufrechterhaltung des rein mineralischen Charakters des Gesamtdämmsystems. Darüber hinaus kann, im Gegensatz zu z. B. durchgängigen, rein glasbasierten transparenten Wärmedämmsystemen, ein kombiniertes Auftreten aus gerichteter (im Glaskörper) und diffuser (im Wärmedämmputz) Reflexion herbeigeführt werden, was sich insbesondere auf reduzierte solare Gewinne in den Sommermonaten auswirken soll. Die anpassbare Kombination dieser Materialien (z. B. Variation der Länge des Glaselements) ermöglicht zudem die Beeinflussung des stationären U -Werts, der ein Maß für den Transmissionswärmeverlust darstellt. Hierdurch kann gegenüber den bisherigen Lösungen (vgl. Abbildung 2.10a „ohne Aerogel“) bei verminderter Dicke des Systems ein geringerer U -Wert erzielt werden.

Für SATIS wurde eine Zielvorgabe des U -Werts von $0,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ und des g -Werts von 20 % (vgl. Abbildung 2.10b „ohne Aerogel“) bei einer Gesamtdicke von 80 mm definiert. Dies soll insbesondere durch Ausnutzung der hochwärmedämmenden Eigenschaften des MHGK-Putzes gegenüber den kunststoff- und glasbasierten Materialien am Markt verfügbarer TWD-Systeme sowie durch die Einbringung der winkelanpassbaren lichtleitenden Elemente erreicht werden. Eine ausführliche, konstruktive Darstellung des entwickelten Prototyps des solarselektiven Wärmedämmsystems wird in Abschnitt 3.3.5 präsentiert.

Um die latente Wärmespeicherung sowie die gezielte zeitliche Verschiebung und Dämpfung

des nach innen gerichteten Wärmestroms und dementsprechend der Innenlufttemperatur (vgl. Abbildung 2.13) mit dem neu entwickelten System bewerten zu können, wird SATIS mit einem neuartigen, formstabilen Phasenwechselmaterial (vgl. Abschnitt 2.3.4) erweitert und untersucht.

In Abschnitt 2.3.3 wurden experimentellen Methoden beschrieben, die getrennte stationäre Messungen zur thermischen (z. B. Heizplattenapparatur) und solarstrahlungstechnischen (z. B. Ulbrichtkugel oder kalorimetrische Messung) Charakterisierung von TWDs vorsehen. Um die definierten Zielsetzungen des SATIS-Konzepts quantitativ überprüfen und somit die Entwicklung bewerten zu können, wurde ein Versuchsaufbau (Differenzklimakammerprüfstand, Abschnitt 3.2) konzipiert und errichtet, in dem sowohl eine separate thermische als auch eine gekoppelte thermische-strahlungstechnische Untersuchung durchgeführt werden kann. Dies bietet im Fall der gekoppelten Untersuchung den Vorteil, dass unter gegebenen, flexibel gestaltbaren Umweltrandbedingungen (z. B. Lufttemperatur und -feuchte, Solarstrahlungsintensität, -dauer und -einstrahlwinkel) die Kombination aus dynamischem Solarstrahlungs- und Wärmetransport innerhalb des neu entwickelten Dämmsystems untersucht werden kann. Hierbei können direkt die Auswirkungen der Absorption und Reflexion der Solarstrahlung in der solarselektiven Wärmedämmung, die Strahlungsleitung zum Absorber, die Wärmespeicherung in einem Massivkörper (z. B. Bestandswand) und die Wärmeleitung innerhalb des Wandsystems experimentell ermittelt werden.

Im Bereich der theoretischen Untersuchung wird ein sukzessiv entwickeltes, multiphysikalisches Modell vorgestellt, mithilfe dessen der Wärme- und Strahlungstransport innerhalb des neu entwickelten solarselektiven Systems simulativ untersucht werden kann. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Modellierung des Strahlungstransports innerhalb der lichtleitenden Elemente, d. h. der Strahlungsbrechung und -transmission durch den Glaskörper sowie der Absorption und diffusen Reflexion durch den Wärmedämmputz bzw. Absorber. Hierbei wird, im Gegensatz zu herkömmlichen Fassaden, bei denen die auftreffende und absorbierte Solarstrahlung durch konventionelle, vektorielle Berechnungen mittels der Fassadenorientierung, der aktuellen Sonnenposition und Strahlungsintensität sowie dem kurzwelligen Absorptionsgrad ermittelt werden kann, ein Ray Tracing Algorithmus verwendet, der die Bestimmung der winkel- und ortsabhängigen Verteilung der Solarstrahlung innerhalb der Kapillare bis hin zum Absorber ermöglicht. Da sich, aufgrund der hohen Sensitivität des entwickelten Systems hinsichtlich des Einstrahlwinkels, das vorgeschlagene Verfahren zur Ermittlung monatlicher effektiver g -Werte und, daraus abgeleitet, die Berechnung der jährlichen solaren Gewinne (vgl. Abschnitt 2.3.3) für das solarselektive Wärmedämmsystem nicht eignet, wird mittels des validierten Modells eine Simulation der jährlichen Energieeinsparung gegenüber einem herkömmlichen System vorgenommen. Um die solarnutzenden Eigenschaften des entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystems in vereinfachter Form (z. B. für marktverfügbare Gebäudesimulationssoftware) verwenden zu können, wird zudem eine Kennfeldmethodik

entwickelt und vorgestellt, mit der die absorbierte Strahlungsleistung geometrie-, winkel-, intensitäts- und ortsabhängig innerhalb des Dämmsystems zur Verfügung gestellt werden kann.

3 Experimenteller Versuchsaufbau und untersuchte Wandkonstruktionen

In diesem Kapitel wird der experimentelle Versuchsaufbau zur stationären und dynamischen Vermessung verschiedenartiger Wandkonstruktionen [122, 123] bzw. Dämmsysteme sowie die untersuchten Wandaufbauten präsentiert. Zu Beginn werden in Abschnitt 3.1 die für die Prüfstandslegung vorhandenen Randbedingungen und die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Auswahl der Prüfstandskomponenten erläutert. Im Anschluss werden die technischen Spezifikationen der Geräte und Sensoren, die im Prüfstand verbaut sind, im Detail beschrieben. Die Messunsicherheiten der aus den Daten der experimentellen Untersuchungen berechneten Größen werden mittels des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes ermittelt [124]. Abschließend erfolgt eine Darstellung der für diese Arbeit relevanten Wandkonstruktionen bzw. Dämmsysteme, die im Prüfstand untersucht wurden. Die Wandkonstruktionen sind so gewählt, dass ausgehend von einem definierten Grundaufbau sukzessive neue Schichten hinzugefügt werden. Somit kann jede hinzukommende Schicht entsprechend ihrer thermischen und strahlungstechnischen Eigenschaften beurteilt werden.

3.1 Zielsetzung

Bei Verwendung der Hot-Box-Methode [125] (Wandkonstruktion zwischen zwei getrennten Kammern) zur thermischen Untersuchung verschiedener Wandkonstruktionen bzw. Dämmsysteme hängt die Qualität der Messergebnisse unter anderem von der Querschnittsfläche der Wandprobe ab. In der Regel wird eine größere Querschnittsfläche der Wandkonstruktion bevorzugt, da hierdurch ein nahezu eindimensionaler Wärmestrom durch den Versuchskörper realisiert werden kann. Hieraus folgt allerdings, dass aufgrund der aufwendigen Herstellung der Proben und der Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur, wie beispielsweise Kräne oder Hubwagen, Umbaumaßnahmen mit einem großen Aufwand verbunden sind. Dies kann mitunter dazu führen, dass aus zeitlichen und / oder logistischen Gründen nur eine geringe Anzahl an Wandkonstruktionen messtechnisch untersucht werden kann.

Die Regularien zur Messung des Wärmedurchlasswiderstands von ungedämmten Mauerwerk-Wandkonstruktionen mittels des Hot-Box-Verfahrens sind in der DIN 1934 [125] festgelegt. Die zulässige Wandprobendicke ist von der verfügbaren Querschnittsfläche, d. h. von der Öffnung des Heizkastens (Wandprobenhalterung), und von der Verwendung einer Seitenflächenisolierung, die um die Wandprobe angeordnet ist, abhängig. Hierdurch soll sichergestellt werden,

dass bei den Messungen durch die Vorgabe des Querschnittsflächen-Dicken-Verhältnisses ein eindimensionaler Wärmefluss vorhanden ist. Bei Verwendung einer Seitenflächenisolierung muss diese eine Dicke von 100 mm sowie eine mindestens fünfmal niedrigere Wärmeleitfähigkeit als die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Wandprobe aufweisen.

Typische Wandstärken von herkömmlichen Bestandsgebäuden um 1930 betragen in Deutschland rund 400 mm [126]. Gemäß DIN 1934 [125] muss die zu untersuchende Probe eine Querschnittsfläche von 1500 mm x 1500 mm aufweisen. Das Gewicht dieser Wandprobe beläuft sich, aufgrund der hohen Rohdichte des Vollziegelmauerwerks ($\approx 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), auf ungefähr 1,6 t. Dieses Gewicht erschwert den flexiblen Austausch von Wandproben, was besonders im Entwicklungsstadium neuartiger Wärmedämmsysteme eine wichtige Rolle spielt.

Solarsimulatoren werden üblicherweise zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von photovoltaischen Zellen eingesetzt. Dementsprechend weisen herkömmliche Solarsimulatoren bestrahlbare Flächen von entweder 2" x 2", 6" x 6", 8" x 8" oder 12" x 12" auf. Für den Einsatz derartiger Geräte zur Untersuchung von Wandkonstruktionen wurden folgende zu erfüllende Kriterien definiert:

- Hohe Übereinstimmung der spektralen Strahlungsintensitäten von Solarsimulator und Sonne (Referenz Sonne: ASTM G173 AM1.5G [127]).
- Strahlungsintensität im Nennbetrieb auf einer senkrecht zur Einfallrichtung bestrahlten Fläche von einer Sonne ($1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) und Abschwächung bis hin zu $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.
- Veränderbarer Austrittswinkel der Solarstrahlung aus dem Solarsimulator (gewöhnlich: Austrittsrichtung senkrecht nach unten).
- Geringe Parallelitätsabweichung der Lichtstrahlen des Solarsimulators (Sonne: $\pm 0,2666^\circ$).

Eine durchgeführte Recherche zu den Solarsimulatoren bekannter Hersteller ergab, dass nur ein Gerät, dessen Spezifikationen in Abschnitt 3.2.2 detailliert erläutert werden, die oben genannten Anforderungen erfüllt. Dieser Solarsimulator weist eine bestrahlbare Fläche von 300 mm x 300 mm (12" x 12") auf. Dementsprechend wurde die Querschnittsfläche der Wandproben auf 300 mm x 300 mm festgelegt. Um trotz der kleinen Querschnittsfläche die Wärmeverluste durch die Seitenflächenisolierung bestmöglich zu reduzieren, wurde, im Gegensatz zu den Vorgaben der Norm [125], ein Dämmmaterial gewählt, welches eine hundertmal geringere Wärmeleitfähigkeit als die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Wandprobe aufweist.

3.2 Prüfstandskomponenten

In den folgenden Abschnitten wird der Differenzklimakammerprüfstand mit seinen Komponenten vorgestellt. Abbildung 3.1a zeigt schematisch den Aufbau des Prüfstands, der

aus einer Differenzklimakammer mit Außen- und Innenbereich, einem Solarsimulator sowie einer Wandprobenhalterung besteht. Weiterhin sind die in beiden Kammern regelbaren physikalischen Größen in Abbildung 3.1a veranschaulicht.

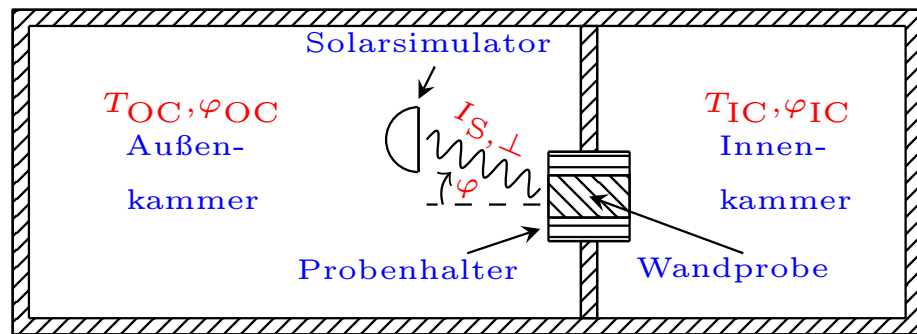
3.2.1 Differenzklimakammer und Wandprobenhalter

Für die Untersuchung der Wandkonstruktionen wird eine Differenzklimakammer, die in einen Außen- und Innenbereich unterteilt ist, verwendet. In beiden Kammern befinden sich getrennt regelbare Heiz- und Kühlaggregate zur Einstellung der Lufttemperaturen und -feuchten. Abbildung 3.1b zeigt die Frontansicht der Differenzklimakammer. Die internen Maße des Außenbereichs betragen 3,4 m x 4 m x 3,7 m (L x B x H), die des Innenbereichs 1,7 m x 4 m x 3,7 m (L x B x H). Hieraus ergeben sich Prüfraumvolumina in der Außen- und Innenkammer von rund 50 m³ bzw. 27 m³. Der Außenbereich ist für einen Temperaturbereich von -15 °C bis 35 °C, der Innenbereich für 15 °C bis 30 °C ausgelegt. Die relative Feuchte kann in der Außenkammer zwischen 2 °C (50 % r. F. - 90 % r. F.) und 35 °C (15 % r. F. - 90 % r. F.) und in der Innenkammer zwischen 15 °C (15 % r. F. - 70 % r. F.) und 30 °C (15 % r. F. - 70 % r. F.) eingestellt werden. Die Kammerwände bestehen aus PU-Sandwichpaneelen mit einer Dicke von 100 mm.

In der Trennwand zwischen dem Außen- und Innenbereich befindet sich die für die Untersuchung der Wandproben konzipierte Probenhalterung, die in Abbildung 3.1c dargestellt ist. Die Öffnung hat eine freie Querschnittsfläche von ca. 304 mm x 304 mm und ermöglicht die Aufnahme von Wandkonstruktionen mit einer maximalen Länge von 500 mm. Der Probenhalter besteht aus einer Mehrschichtisolierung, um die Randwärmeverluste zu minimieren. Hierzu werden Vakuumisulationspaneele ($\lambda_B = 0,007 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [128]) mit einer Dicke von 30 mm verwendet, die durch eine 2 mm Acrylglas-Platte vor Beschädigungen durch die Wandprobe geschützt sind. Die Paneele sind auf der Außenseite zusätzlich mit einer 60 mm XPS-Isolierung ($\lambda_B = 0,034 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [129]) versehen. Die nötige Stabilität der Wandprobenhalterung wird durch eine 24 mm Siebdruckplatte ($\lambda = 0,17 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [130]) auf der Außenseite gewährleistet.

3.2.2 Solarsimulator

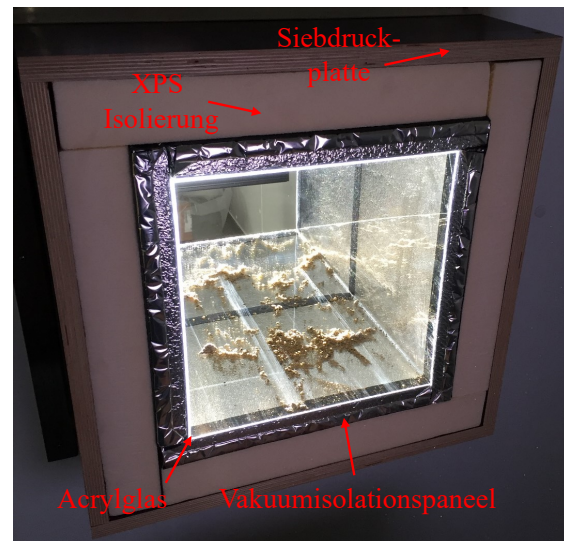
Bei dem für die strahlungstechnischen Untersuchungen verwendeten Solarsimulator, welcher in Abbildung 3.2a dargestellt ist, handelt es sich um einen Klasse AAA Solarsimulator der Fa. Optical Associates Inc. (OAI). Er besitzt eine maximal bestrahlbare Fläche von 300 mm x 300 mm. Sowohl die Strahlungsintensität als auch das Strahlungsspektrum des Solarsimulators stimmen durch die Verwendung einer 2,5 kW Xenon-Kurzbogenlampe als Lichtquelle, diverser Spiegel, Linsen und spektraler Filter sehr gut mit den entsprechenden Größen der Sonne überein. Mittels eines drehbar gelagerten, rotierenden Spiegels und der speziell für den Solarsimulator angefertigten Hubvorrichtung besitzt das Gerät einen rotatorischen und zwei



(a) Schematische Darstellung des Differenzklimakammerprüfstands zur Untersuchung von Wandkonstruktionen mit den regelbaren physikalischen Größen.

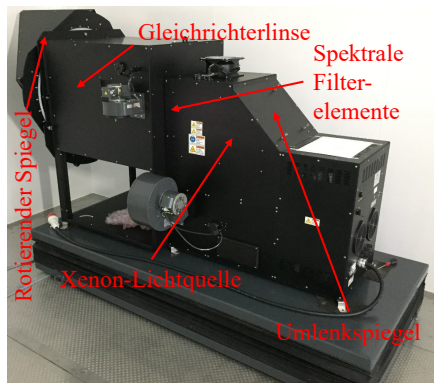


(b) Vorderansicht der Differenzklimakammer.

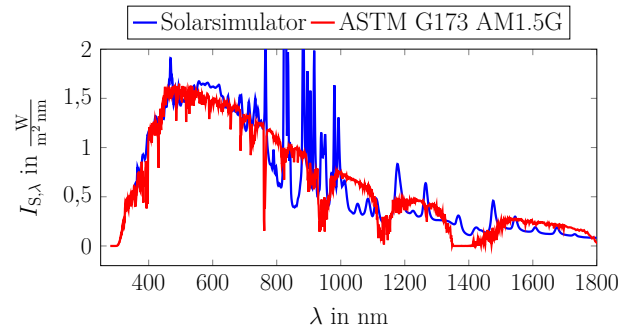


(c) Wandprobenhalterung bestehend aus einer Mehrschichtisolierung.

Abbildung 3.1: Darstellung der Differenzklimakammer bestehend aus einem Außen- und Innenbereich (a und b) sowie einer Wandprobenhalterung (c).



(a) Solarsimulator im Außenbereich der Differenzklimakammer auf der speziell angefertigten Hubvorrichtung.



(b) Spektrale Strahlungsintensität des Solarsimulators im Vergleich zu ASTM G173 AM1.5G [127].

Abbildung 3.2: Darstellung des Solarsimulators (a) und der spektralen Strahlungsintensität des Solarsimulators im Vergleich zu ASTM G173 AM1.5G (b).

translatorische Freiheitsgrade. Auf diese Weise kann die Solarstrahlung auf der Außenoberfläche der untersuchten Wandkonstruktion unter verschiedenen Einstrahlwinkeln aufgebracht werden. Die den Solarsimulator am rotierenden Spiegel verlassenden Lichtstrahlen haben eine Parallelitätsabweichung kleiner $\pm 2^\circ$ (halber Winkel).

Für die Klassifizierung in die höchste Genauigkeitsklasse [131] benötigt der Solarsimulator eine Übereinstimmung der integralen Strahlungsintensität von $\pm 25\%$ mit ASTM G173 AM1.5G innerhalb spezifischer Wellenlängenbänder. Abbildung 3.2b zeigt die spektrale Strahlungsintensität ($I_{S,\lambda}$) des Solarsimulators im Vergleich zu derjenigen von ASTM G173 AM1.5G [127]. Die integrale Übereinstimmung in den spezifischen Wellenlängenbändern ist in Tabelle 3.1 aufgeführt und zeigt, dass der Solarsimulator eine maximale Abweichung von ASTM G173 AM1.5G von $+3,9\%$ beziehungsweise $-3,3\%$ hat. Im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (380 nm–780 nm) beträgt diese Abweichung nur $0,7\%$. Weiterhin muss laut [131] der Solarsimulator innerhalb einer senkrecht bestrahlten Fläche eine Gleichförmigkeit der Solarstrahlung mit einer maximalen Abweichung von $\pm 2\%$ aufweisen. Der verwendete Solarsimulator liegt mit einer Abweichung von $\pm 2\%$ im zulässigen Bereich. Zusätzlich müssen laut [131] die kurzfristigen Schwankungen der Strahlung des Solarsimulators innerhalb eines Bands von $\pm 0,5\%$, die langfristigen innerhalb von $\pm 2\%$ liegen. Die kurzfristigen Schwankungen des verwendeten Solarsimulators betragen $\pm 0,29\%$, die langfristigen $\pm 0,93\%$, womit beide Werte innerhalb der in [131] festgelegten Grenzen liegen.

3.2.3 Datenerfassung und Sensorik

Zur Erfassung der Messdaten werden Datenlogger der Fa. Pico Technology verwendet. Zur Erfassung analoger Spannungssignale (Wärmeflussmessplatte, Feuchtesensoren) wird ein

Tabelle 3.1: Übereinstimmung der integralen Strahlungsintensität des Solarsimulators in spezifischen Wellenlängenbändern mit ASTM G173 AM1.5G.

λ in nm	Übereinstimmung	λ in nm	Übereinstimmung
350-500	99,2 %	500-600	98,4 %
600-700	99,7 %	700-800	100,1 %
800-900	103,9 %	900-1100	101,6 %
1100-1300	96,7 %	1300-1800	101,2 %

24-bit A/D-Wandler mit sieben verschiedenen Messbereichen eingesetzt. Dieser besitzt eine Messunsicherheit von $45 \mu\text{V}$ im kleinsten ($\pm 39 \text{ mV}$) und $5,4 \text{ mV}$ im größten Messbereich ($\pm 2500 \text{ mV}$). Um die Temperatur zu erfassen, werden Datenerfassungsgeräte (Gerätename: PT104) mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,015^\circ\text{C}$ verwendet. Alle Messgrößen werden minütlich durch LabVIEW aufgezeichnet.

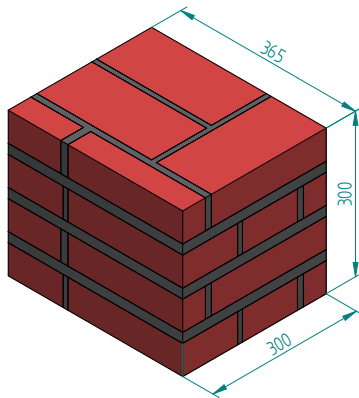
Bei den Temperatursensoren handelt es sich um Pt100 1/10 DIN Klasse B Sensoren ($\pm 0,03^\circ\text{C}$) der Fa. Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH (TMH). Zur Ermittlung der Lufttemperatur wird der Sensor in den Kammern in einer Aufhängung befestigt, die mit einem Strahlungsschutz versehen ist. Wärmeflussplatten der Fa. Phymas mit einer Messunsicherheit von $\pm 5\%$ v. M. werden zur Messung der Wärmestromdichten verwendet. Die relative Feuchte im Außen- und Innenbereich wird mittels kapazitiver Feuchtesensoren der Fa. Galltec erfasst, die eine Messunsicherheit von $\pm 1,5\%$ r. F. im Bereich von 10% r. F. bis 90% r. F. aufweisen.

3.3 Wandkonstruktionen

Zu Beginn dieses Abschnitts werden die konstruktiven und materialtechnischen Details zum Grundkörper aller untersuchten Wandkonstruktionen erläutert. Anschließend wird der Aufbau der ungedämmten Wandprobe (WK1), die als Referenz für ein existierendes Bestandsgebäude dient, vorgestellt. Im Folgenden werden die mit neuartigen Wärmedämmputzen gedämmten Bestandswandkonstruktionen aufgeführt. Hierbei handelt es sich zum einen um die Wandprobe mit Mikrohohlglaskugel (MHGK)-Wärmedämmputz (WK2) und zum anderen um die Wandprobe mit Aerogel-Wärmedämmputz (WK3). Weiterhin wird der Prototyp des entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystems (WK4) zur winkelabhängigen Solarenergienutzung auf Basis des MHGK-Wärmedämmputzes vorgestellt. Abschließend wird der solarselektive Wandaufbau durch eine zusätzliche Schicht aus Phasenwechselmaterial zur Latentwärmespeicherung erweitert (WK5).

3.3.1 Grundkörper

Für die Untersuchung der verschiedenen Dämmsysteme wird für alle Wandkonstruktionen der in Abbildung 3.3 dargestellte Grundkörper mit einer Querschnittsfläche von 300 mm x 300 mm und einer Länge von 365 mm verwendet. Der Aufbau besteht aus vier Schichten, wobei je Schicht drei komplette Vollziegel mit den Maßen 240 mm x 115 mm x 60 mm (L x B x H), entsprechend Abbildung 3.3a, zum Aufbau verwendet werden. Zusätzlich werden, je Schicht versetzt angeordnet, zwei Teilstücke der Vollziegel eingebracht, um einen stabilen Mauerwerksverband sowie die für die Wandprobenhalterung aus Abschnitt 3.2.1 notwendige Querschnittsfläche von 300 mm x 300 mm zu erhalten. Abbildung 3.3b zeigt die im Labor hergestellten Grundkörper, die im Anschluss mit verschiedenen Dämmsystemen versehen werden können.



(a) Isometrische Ansicht des Grundkörpers, der allen untersuchten Wandkonstruktionen zugrunde liegt.



(b) Im Labor hergestellte Grundkörper, die mit verschiedenen Dämmsystemen versehen werden können.

Abbildung 3.3: Grundkörper der Wandkonstruktionen, bestehend aus Vollziegeln und Zementmörtel.

Bei den verwendeten Vollziegeln handelt es sich um durch eine Ziegelmanufaktur handgefertigte Ziegel („Handschlagziegel“), die explizit den in Bestandsgebäuden in Deutschland um 1930 verwendeten Ziegeln nachempfunden sind. Vorteil eines Vollziegelmauerwerks ist dessen hohe Wärmespeicherfähigkeit, die effektiv als Überhitzungsschutz oder Solarenergiespeicher verwendet werden kann. Aufgrund der hohen Rohdichte hat das Mauerwerk allerdings eine hohe Wärmeleitfähigkeit, die - vor allem in Wintermonaten bei großer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenbereich - zu hohen Wärmeverlusten führt. Zur bestmöglichen Reproduktion der Vollziegel wurden ursprünglich verbaute Ziegel aus dem Jahr 1930 aus einem Bestandsgebäude hinsichtlich deren Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität mit dem Transient Hot Bridge (THB)-Verfahren [132]) vermessen, um

anschließend im Vergleich mit mehreren angefertigten Vollziegeln der Ziegelmanufaktur den thermophysikalisch Ähnlichsten auszuwählen. Bei dem zur Herstellung des Mauerwerksverbandes verwendeten Mörtel handelt es sich um einen gewöhnlichen Zementmörtel, der oftmals auch zur damaligen Zeit zum Einsatz kam.

3.3.2 Ungedämmte Bestandwandkonstruktion (WK1)

Abbildung 3.4 zeigt die ungedämmte Wandkonstruktion (WK1), die typisch für Gebäude aus den 1930er Jahren in Deutschland ist. Die Wandkonstruktion besteht aus einem Kalk-Gips-Innenputz [133], dem Grundkörper aus Vollziegelmauerwerk und einem Kalk-Zement-Außenputz [134]. Als Innenfarbe wurde eine Silikatfarbe [135], als Außenfarbe eine Silikonharzfarbe [136] verwendet. Die Wandstärken der jeweiligen Schichten sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.



Abbildung 3.4: Ungedämmte Bestandwandprobe (WK1).

Tabelle 3.2: Materialien und Schichtdicken der ungedämmten Wandkonstruktion (WK1).

	Material	Dicke in mm	Referenz
	Innenfarbe	-	[135]
a	Kalk-Gipsputz	15 ± 2	[133]
b	Vollziegelmauerwerk	365 ± 5	-
c	Kalk-Zementputz	20 ± 2	[134]
	Außenfarbe	-	[136]

Die wesentliche Kenngröße für die Absorption der Solarstrahlung durch die Fassade ist der kurzwellige Absorptionsgrad der Außenfarbe. Die für die Wandproben verwendete Außenfarbe wurde hinsichtlich ihres spektralen kurzwelligen Absorptionsgrads mittels einer Ulbrichtkugel vermessen. Abbildung 3.5 zeigt den gemessenen spektralen Absorptionsgrad der Außenfarbe ($\alpha_{OS,\lambda}$). Außerhalb des UV-Bereichs (ab 380 nm) weist die Farbe einen für weiße Farben typisch geringen Absorptionsgrad (hohen Reflexionsgrad) auf. Im für den Solarsimulator relevanten Wellenlängenbereich liegt der integrale Mittelwert des Absorptionsgrads (α_{OS}), der entsprechend Gleichung (3.1) bestimmt wird, bei 19,6 %.

$$\alpha_{OS} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \alpha_{OS,\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

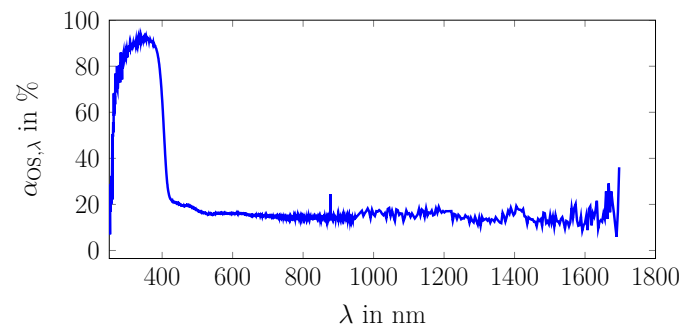


Abbildung 3.5: Spektraler Absorptionsgrad der Außenfarbe ($\alpha_{OS,\lambda}$).

3.3.3 Gedämmte Wandkonstruktion mit Mikrohohlglaskugel-Dämmputz (WK2)

Für die energetische Sanierung der ungedämmten Wandkonstruktion aus Abschnitt 3.3.2 wird der neuartige, mit Mikrohohlglaskugeln als Füllstoff versehene Wärmedämmputz maxit eco72 mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,040 \frac{W}{mK}$ [54] verwendet. Der Wärmedämmputz wird mit einer typischen Wandstärke von 80 mm auf den Kalk-Zement-Außenputz aufgebracht, wobei vorab ein Anwurf [137] zur Verbesserung der Haftung und zur Reduzierung der Saugfähigkeit des ursprünglichen Außenputzes appliziert wird. Die untersuchte Wandprobe mit dem MHGK-Dämmputz (WK2) ist in Abbildung 3.6 visualisiert. Die Schichtstärken aller verwendeten Materialien sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

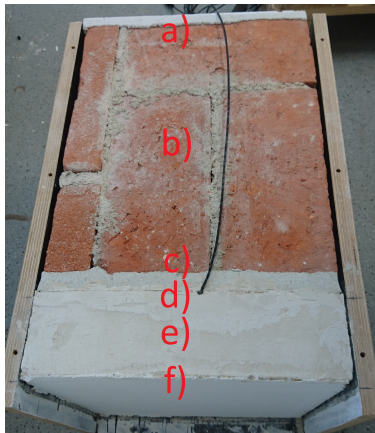


Abbildung 3.6: Wandkonstruktion mit Mikrohohlglaskugel-Dämmputz (WK2).

Tabelle 3.3: Materialien und Schichtdicken der Wandkonstruktion mit Mikrohohlglaskugel-Dämmputz (WK2).

	Material	Dicke in mm	Referenz
	Innenfarbe	-	[135]
a	Kalk-Gipsputz	15 ± 2	[133]
b	Vollziegelmauerwerk	365 ± 5	-
c	Kalk-Zementputz	20 ± 2	[134]
d	Anwurf	-	[137]
e	Wärmedämmputz mit Mikrohohlglaskugeln	80 ± 2	[54]
f	Armierungsmörtel und Deckputz	3	[138, 139]
	Außenfarbe	-	[136]

Um die notwendige Widerstandsfähigkeit der Wärmedämmschicht gegenüber mechanischen Belastungen zu gewährleisten, wird ein Armierungsmörtel mit Gewebe [138] sowie ein Deckputz [139] als oberste Schicht aufgebracht. Hinter der Wärmedämmschicht, in der Mitte der Wandkonstruktion, befindet sich ein Temperatursensor, um die durch die Außenfassade absorbierte und durch die Dämmschicht geleitete Wärme, die zu einer Temperaturerhöhung innerhalb der Wandkonstruktion führt, quantifizieren zu können.

3.3.4 Gedämmte Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3)

Der Wärmedämmputz HASIT Fixit 222 beinhaltet granulares Aerogel als Zuschlagsstoff und wird als Vergleichsdämmsystem zum Mikrohohlglaskugel-Dämmputz für die Prüfstandsuntersuchungen herangezogen. Die mit dem Aerogel-Dämmputz versehene Wandkonstruktion (WK3) ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Hierbei wurde eine Schichtstärke des Dämmputzes von 50 mm gewählt, sodass die Wandkonstruktion WK3 einen ähnlichen Wärmeleitwert wie WK2 aufweist. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt $0,028 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [53]. Auch WK3 besitzt auf der Wandaußenseite eine auf den Wärmedämmputz abgestimmte Armierungs- [140] und Deckschicht [141] und es wurde ebenfalls ein Temperatursensor hinter der Dämmschicht in der Mitte der Wandkonstruktion platziert. Die Wanddicken und verwendeten Materialien sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

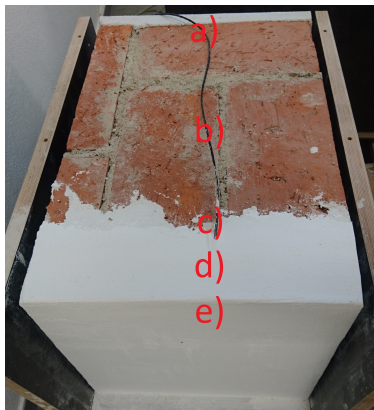


Abbildung 3.7: Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3).

Tabelle 3.4: Materialien und Schichtdicken der Wandkonstruktion mit Aerogel-Dämmputz (WK3).

	Material	Dicke in mm	Referenz
	Innenfarbe	-	[135]
a	Kalk-Gipsputz	15 ± 2	[133]
b	Vollziegelmauerwerk	365 ± 5	-
c	Anwurf	-	[142]
d	Wärmedämmputz mit Aerogel	50 ± 2	[53]
e	Armierungsmörtel und Deckputz	3	[140, 141]
	Außenfarbe	-	[143]

3.3.5 Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem (WK4)

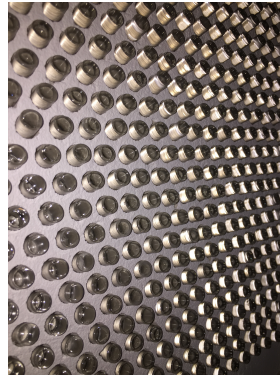
Zur Erreichung der in Kapitel 1 definierten Zielvorgaben des SATIS-Konzepts wurde in dieser Arbeit ein Proof-of-Concept Prototyp erstellt. Mithilfe der experimentellen und numerischen Untersuchung dieses Prototyps wird eine quantitative Bewertung des solarselektiven Wärmedämmsystems vorgenommen.

Der entwickelte, hergestellte und untersuchte Prototyp besteht in seiner Grundstruktur aus dem seit Kurzem auf dem Markt verfügbaren mineralischen MHGK-Wärmedämmputz maxit eco 72 [54, 66] und ist in Abbildung 3.8 dargestellt. In das Basismaterial werden, abhängig vom späteren Einsatzort, anpassbare lichtleitende Elemente eingebracht. Der MHGK-Wärmedämmputz wird für die Herstellung eines Paneels in eine entsprechende Form mit einer Querschnittsfläche von 300 mm x 300 mm (Maße Wandprobenhalter, vgl. Abschnitt 3.2.1) gebracht. Die Dicke des Paneels (80 mm) wurde analog zu WK2 (vgl. Abschnitt 3.3.3) gewählt. Nach der Trocknung des Paneels innerhalb der Form wurde der Prototyp mittels einer CNC-Maschine weiterbearbeitet. In diesem Schritt wurden die variabel anpassbaren, lichtleitenden Elemente hergestellt. Für den Prototyp wurden Stufenbohrungen mit Durchmessern von 8 mm und 6 mm gewählt, die unter einem Winkel von 19° senkrecht zur Oberfläche angestellt sind. Der Anstellwinkel von 19° wurde gewählt, da dieser einer typischen Mittags-Sonnenhöhe in Wintermonaten in Süddeutschland entspricht (vgl. z. B. Sonnenstandsdiagramm 49° Nord [144]). Ziel ist es, bei hohen Sonnenständen in Sommermonaten einen ausreichenden Schutz vor Überhitzung durch Eigenverschattung zu gewährleisten. Bei tiefstehender Sonne in Wintermonaten soll Solarstrahlung das solarselektive Dämmsystem durchdringen und zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag führen. Die beiden unterschiedlichen Durchmesser des lichtleitenden Elements wurden deshalb gewählt, da hierdurch Anschläge für die auf der Außenseite eingebrachten Verschlusselemente hergestellt werden können. Im Prototyp wurden insgesamt 473 lichtleitende Elemente eingebracht, was einem Flächenanteil auf der Außenseite von 26,4 % (8 mm Durchmesser) und auf der Innenseite von 14,9 % (6 mm Durchmesser) entspricht. Durch die versetzte Anordnung (60° Innenwinkel zwischen zwei Reihen) wurde zwischen den Bohrungen auf der Außenseite ein konstanter Abstand von 5 mm realisiert. Dies ermöglicht, gegenüber einer fluchtenden Anordnung, eine dichtere Besetzung der Oberfläche mit lichtleitenden Elementen. Nachdem das Paneel mechanisch bearbeitet wurde, erfolgte im letzten Schritt die Applikation der Außenfarbe [136].

Abbildung 3.8a zeigt die Frontansicht des hergestellten Paneel-Prototyps. Der Fokus in diesem Entwicklungsschritt liegt in einem Proof-of-Concept, d. h. der Herstellung, der experimentellen und numerischen Untersuchung sowie der thermophysikalischen Optimierung. Die lichtleitenden Elemente wurden außenseitig mit Borosilikatglas-Zylindern (8 mm Durchmesser, 20 mm Länge), die einen Transmissionsgrad von ca. 90 % im kurzwelligen und nahen IR-Bereich aufweisen [145], verschlossen. Die Glaszylinder wurden an den Stirnseiten



(a) Frontansicht des prototypisch hergestellten, solar-selektiven Wärmedämmsystems.



(b) Paneel des solar-selektiven Wärmedämmsystems mit auf der Außenseite eingebrachten Borosilikatglas-Zylindern.



(c) Applikation der Absorber-Klebeschicht auf dem Vollziegelmauerwerk in der Wandprobenhalterung.

Abbildung 3.8: Hergestellter Prototyp des solar-selektiven Wärmedämmsystems und Applikation der Absorber-Klebeschicht.

verschmolzen, nachdem sie auf eine Länge von 20 mm geschnitten wurden. Hierdurch konnte die Glastrübung an den Schnittkanten entfernt werden. Abbildung 3.8b zeigt das komplette solar-selektive Wärmedämmsystem, welches für die prototypischen Untersuchungen auf dem Vollziegelmauerwerk-Grundkörper (vgl. Abschnitt 3.3.1) appliziert wurde. Abbildung 3.8c zeigt die hierzu verwendete Absorber-Klebeschicht mit dem darin befindlichen Temperatursensor, die auf dem Vollziegelmauerwerk angebracht wird. Hierbei handelt es sich um einen Klebemörtel [146], dem 5 wt% Eisenoxid-Partikel [147] zugegeben wurden, um eine Schwarzfärbung der Absorberschicht zu erreichen. Abbildung 3.9 zeigt den gemessenen, spektralen Absorptionsgrad dieser Absorber-Klebeschicht ($\alpha_{\text{Absorber},\lambda}$), der über einen großen Wellenlängenbereich nahezu konstant ist. Zudem ist der Absorptionsgrad des Wärmedämmputzes dargestellt ($\alpha_{\text{Plaster},\lambda}$), der für die Interaktion der einfallenden Strahlung mit den inneren Oberflächen des lichtleitenden Elements von Bedeutung ist.

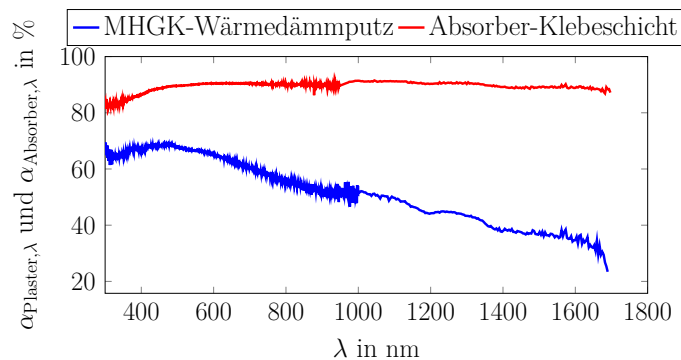
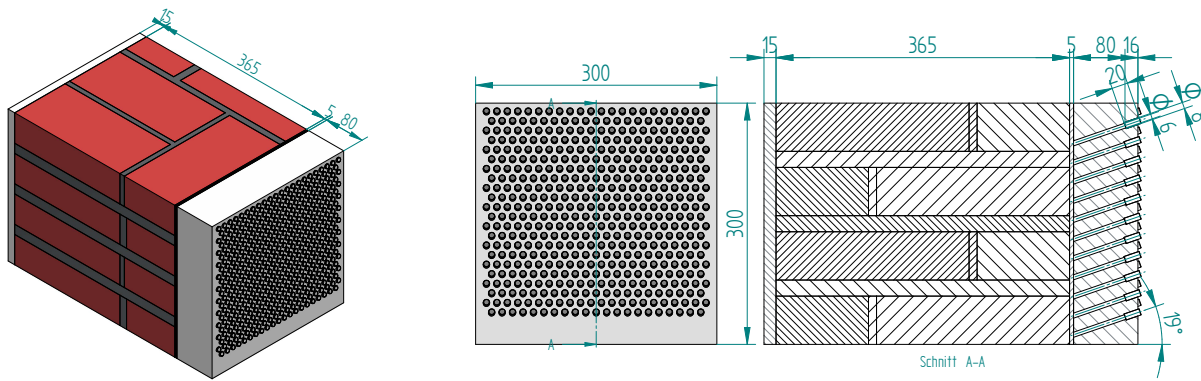


Abbildung 3.9: Spektraler Absorptionsgrad des MHGK-Dämmputzes ($\alpha_{\text{Plaster},\lambda}$) [54] sowie der Absorber-Klebeschicht ($\alpha_{\text{Absorber},\lambda}$) [146, 147].

Ersetzt man in Gleichung (3.1) α_{OS} und $\alpha_{OS,\lambda}(\lambda)$ durch $\alpha_{Plaster} / \alpha_{Plaster,\lambda}(\lambda)$ bzw. $\alpha_{Absorber} / \alpha_{Absorber,\lambda}(\lambda)$, erhält man integral gemittelte Absorptionsgrade von 50,7 % bzw. 89,5 %. Bei den Untersuchungen des Prototyps wurde die Absorber-Klebeschicht mit einer Dicke von 5 mm appliziert. Das Anpressen des Panels auf das Vollziegelmauerwerk resultierte in einer mittleren Eindringtiefe des Klebemörtels in die Bohrungen von 6,6 mm (30 Messungen gleichverteilt über die Oberfläche).

Die Wandprobe mit solarselektivem Wärmedämmsystem (WK4) wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit WK2 auf der Wandinnenseite ebenfalls mit einem Kalk-Gipsputz [133] und einer Silikatfarbe [135] versehen. Die Gesamtkonstruktion ist sowohl in isometrischer als auch in Front- und Schnittansicht mit den Nennlängen der einzelnen Bestandteile in den Abbildungen 3.10a und 3.10b veranschaulicht.



(a) Isometrische Ansicht der Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem (WK4).

(b) Front- (links) und Seitenansicht (rechts) der Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem (WK4).

Abbildung 3.10: Auf einem Grundkörper applizierter Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems (WK4) sowie dessen konstruktive Ausführung. Die Nennlängen der Komponenten sind in Millimeter angegeben.

Wie bereits mehrfach ausgeführt und in Abbildung 3.1a dargestellt, erlaubt der Solarsimulator nur eine Variation des Polarwinkels (φ) im Differenzklimakammerprüfstand. Zur Untersuchung von WK4 hinsichtlich der Abweichungen der Sonnenposition vom wahren Mittag ($\psi \neq 0^\circ$), wurde, anstatt einer Rotation der Lichtquelle, eine zusätzliche Ost-West-Schrägstellung der Bohrungen im solarselektiven Panel zur Simulation des Azimut-Einflusses vorgenommen [148]. Abbildung 3.11 zeigt in der Draufsicht von Wandkonstruktion WK4 (vgl. Abbildung 3.10a für isometrische Ansicht) die Bohrungsverläufe von WK4 (blau) sowie die beiden Bohrungsvarianten mit einer Azimut-Komponente (grün). Bei den beiden Varianten handelt es sich um WK4-3.4 mit einem Azimut von $\psi = 3,4^\circ$ und WK4-12.1 mit $\psi = 12,1^\circ$. Der für WK4 gewählte Anstellwinkel zur Horizontalen von $\varphi = 19^\circ$ (vgl. Abbildung 3.10b

für die Seitenansicht) bleibt auch für diese beiden Varianten erhalten.

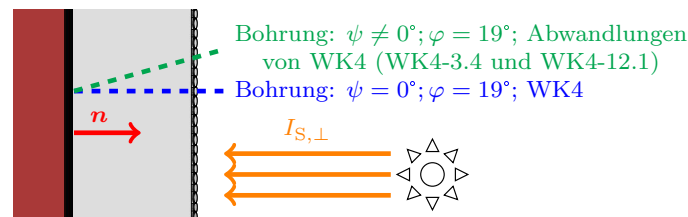


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Bohrungsachsen im solarselektiven Wärmedämmsystem für weitere Varianten von WK4 (WK4-3.4 und WK4-12.1) zur Ermittlung des Azimut-Einflusses in den Prüfstandsuntersuchungen.

3.3.6 Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem und PCM-Schicht (WK5)

Zur Erweiterung der Wandkonstruktion mit solarselektivem Wärmedämmsystem wurde eine Variante mit einer integrierten PCM-Schicht (WK5) hergestellt. Ziel ist es hierbei, auf effiziente Weise die Energiespeicherfähigkeit der Wandkonstruktion zu erhöhen und gleichzeitig, aufgrund der Latentwärmespeicherung der Solarenergie, die Temperatur im Wandaufbau zu senken, was demzufolge zu einem reduzierten Wärmeverlust über die solarselektive Wärmedämmschicht führt. Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 ausführlich erörtert, ermöglichen formstabile PCMs, die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind, eine hohe Energiespeicherdichte mit bis zu 80 wt% PCM, wodurch nur geringe Schichtstärken notwendig sind. Weiterhin erlaubt die Paneel-Form des formstabilen PCMs, ähnlich zum solarselektiven Wärmedämmsystem, eine einfache Applikation durch Ankleben.

In den vorliegenden Untersuchungen wurde das Paraffin-basierte Polymercompound-Paneel der Fa. smartpolymer GmbH [119], welches in Abbildung 3.12a dargestellt ist, einen PCM-Anteil von 75 wt% (PARAFOL 17-97 [149]) aufweist und einen Schmelzbereich von 19 °C bis 23 °C (typisch: 21 °C) umfasst, verwendet. Zur Erhöhung der Energiespeicherfähigkeit wurden zwei Platten zu je 5 mm vor der Applikation am Vollziegelmauerwerk miteinander verklebt. Das Polymercompound weist eine Wärmeleitfähigkeit von $0,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, eine Dichte von $740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und eine Energiespeicherdichte von $518 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ bei einer Plattendicke von 5 mm auf.

Abbildung 3.12b zeigt die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des im Polymercompound enthaltenen PCMs PARAFOL 17-97 [149], wobei ein ausgeprägtes Maximum bei 21 °C sowie eine Hysterese beim Heiz- bzw. Abkühlvorgang des Materials zu erkennen ist. Im realisierten Prototyp WK5 wurde zunächst die PCM-Schicht und anschließend das solarselektive Wärmedämmsystem appliziert (vgl. Abbildung 3.12c). Im Gegensatz zu Wandkonstruktion WK4, in die nur ein Temperatursensor integriert wurde, beinhaltet WK5 in beiden Klebeschichten, d. h. links und rechts des PCM-Paneels, Sensoren.

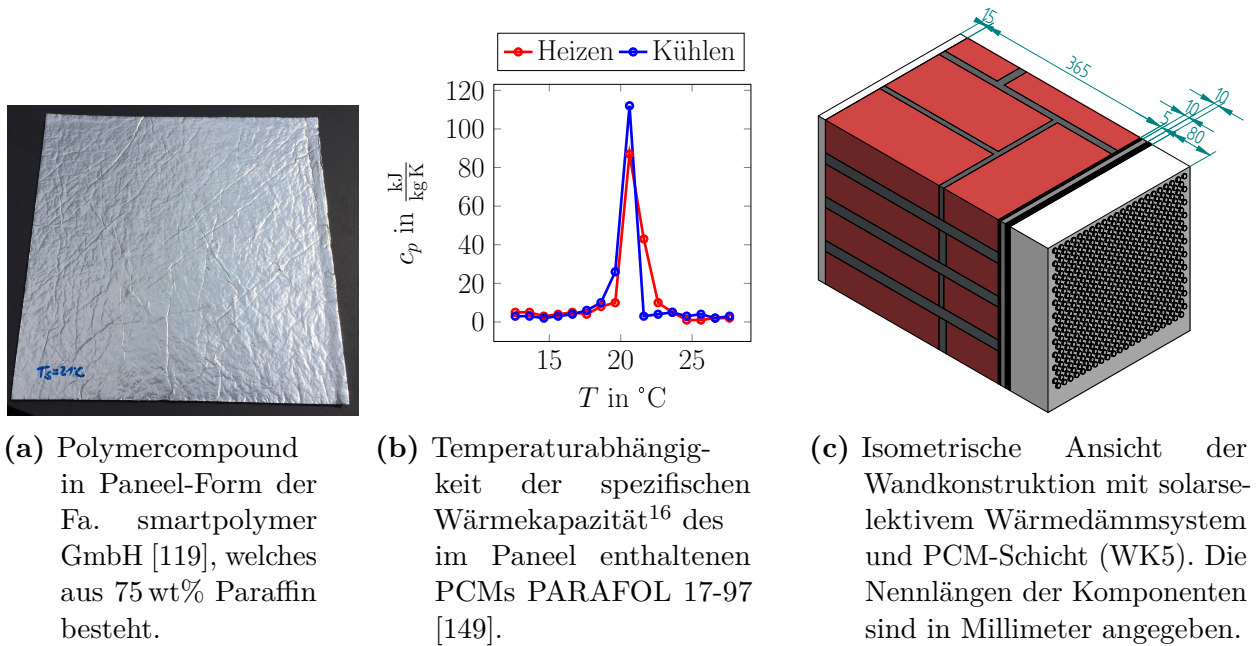


Abbildung 3.12: Formstables PCM-Paneel der Fa. smartpolymer GmbH [119], Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität und Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems mit PCM-Schicht auf einem Grundkörper (WK5).

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zunächst die konzipierte und errichtete experimentelle Infrastruktur zur thermischen und strahlungstechnischen Untersuchung verschiedener Wandkonstruktionen detailliert erläutert. Hierbei handelt es sich um einen Differenzklimakammerprüfstand, bestehend aus einer Außen- und Innenkammer mit regelbarer Lufttemperatur und -feuchte, einem Solarsimulator mit variablem Einstrahlwinkel und regelbarer Solarstrahlungsintensität sowie einer Wandprobenhalterung. Anschließend erfolgte eine Darstellung verschiedenartiger Wandkonstruktionen, ausgehend von der für Bestandsgebäude typischen, ungedämmten Wandstruktur (WK1) über sanierte Varianten mit Hochleistungswärmedämmputzen auf Basis von Mikrohohlglaskugeln (WK2), bzw. Aerogel (WK3), bis hin zum neu entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystem ohne (WK4) und mit PCM-Schicht (WK5).

¹⁶Die Messungen wurden mittels 3-Schicht-Kalorimeter durchgeführt und durch die smartpolymer GmbH zur Verfügung gestellt.

4 Verfahren zur Ermittlung des Wärmeleitwerts im Wandprüfstand

Dieses Kapitel behandelt die Bestimmung des stationären Wärmeleitwerts der Wandkonstruktionen aus Abschnitt 3.3. Hierbei werden entwickelte Verfahren zur Ermittlung des Wärmeleitwerts für ungedämmte und gedämmte Wandkonstruktionen im Differenzklimakammerprüfstand vorgestellt und mittels Messungen verifiziert.

4.1 Zielsetzung

Die Ermittlung des Wärmeleitwerts oder der Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen bzw. mehrschichtigen Wandkonstruktionen kann unter Laborbedingungen über eine Vielzahl an genormten Verfahren, wie beispielsweise der Hot-Box-Methode [125] oder auch mittels Plattenapparat [150], erfolgen. Zwecks Vergleichbarkeit verschiedener Dämmmaterialien werden diese Kenngrößen oftmals unter Nennbedingungen [151] (z. B. 10 °C trocken) ermittelt. Durch die Verwendung von Sicherheitszuschlägen bzw. die Anwendung von Umrechnungsfaktoren auf diese Nennwerte, die die Einflüsse der Temperatur, Feuchte oder Alterung berücksichtigen, können die für den Wärmeschutznachweis der EnEV benötigten Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden [151, 152].

Für neue Materialien sind derartige Umrechnungsfaktoren oftmals nicht bekannt und müssen über Experimente ermittelt werden. Werden hygroskopische Materialien verwendet, ist mit einem deutlichen Einfluss der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit zu rechnen [153]. Daher ist es von Bedeutung, dass der Wärmeleitwert in Laboraufbauten unter beliebigen Lufttemperaturen und -feuchten sowie ggf. über längere Zeiträume ermittelt werden kann. Für den konzipierten Differenzklimakammerprüfstand aus Kapitel 3, der beliebige Umweltrandbedingungen und eine hohe Flexibilität bei der Applikation der Wandkonstruktionen aufgrund der reduzierten Probengröße ermöglicht, werden Methoden zur Ermittlung des Wärmeleitwerts, hier am Beispiel der ungedämmten Wandkonstruktion (WK1) und der herkömmlich gedämmten Wandkonstruktionen (WK2 und WK3), präsentiert und mit Experimenten validiert.

4.2 Methodik

Im Folgenden werden zwei Berechnungsmethodiken für die Ermittlung der Wärmeleitwerte von ungedämmten und gedämmten Wandkonstruktionen, die Voraussetzungen für deren Anwendbarkeit sowie die experimentellen Versuchsbedingungen vorgestellt.

4.2.1 Eindimensionale Betrachtung bei ungedämmten Wandkonstruktionen

Die in der DIN 1934 [125] beschriebene Methodik setzt zur Ermittlung des Wärmeleitwerts entsprechend große Querschnittsflächen voraus, was bereits ausführlich in Abschnitt 3.1 erläutert wurde. Allgemeines Ziel derartiger Untersuchungen ist es, Randwärmeverluste quer zur Hauptwärmestromrichtung zu minimieren, sodass ein möglichst eindimensionaler Wärmetransport während der experimentellen Untersuchung vorliegt. Abbildung 4.1 zeigt schematisch eine ungedämmte Wandkonstruktion, bestehend aus drei Schichten mit Seitenflächenisolierung, sowie die ein- ($\dot{Q}_{IS}$) und austretenden ($\dot{Q}_{OS}$) Wärmeströme der Wandkonstruktion. Weiterhin sind die Temperaturniveaus der Innen- (T_{IC}) und Außenluft (T_{OC}) sowie der Wandinnen- (T_{IS}) und -außenseite (T_{OS}) dargestellt. Unter stationären Bedingungen, bei denen transiente Speichereffekte bereits abgeklungen sind, ergibt sich $\dot{Q}_{IS} = \dot{Q}_{OS} = \dot{Q}$, d. h. jede der drei dargestellten Schichten wird vom gleichen Wärmestrom ($\dot{Q}$) durchflossen. Da es sich um ebene Geometrien handelt, liegt zudem eine konstante Wärmestromdichte ($\dot{q} = \text{const.}$) vor. Bei konstanten Schichtdicken und homogenen Materialien können die drei flächenspezifischen thermischen Widerstände ($R_{th,i}$ mit $i = 1 \dots 3$) über das Verhältnis aus Schichtdicke zu Wärmeleitfähigkeit (δ_i/λ_i) bzw. über die anliegende Temperaturdifferenz ($R_{th,i} = \Delta T_i/\dot{q}$) ermittelt werden. In entsprechenden Versuchsaufbauten sind oftmals nur die Oberflächentemperaturen auf beiden Seiten bekannt, sodass experimentell nur der gesamte thermische Wärmeleitwiderstand ($\sum R_{th,i}$) bzw. der Wärmeleitwert (Λ) als Kehrwert, entsprechend Gleichung (4.1), ermittelt werden kann.

$$\Lambda = \frac{\dot{q}}{\Delta T_{IS-OS}} = \frac{\dot{q}}{T_{IS} - T_{OS}} \quad (4.1)$$

Hierin bezeichnen T_{IS} und T_{OS} die Innen- bzw. Außenwandtemperatur. Die Messunsicherheit des Wärmeleitwerts wird hierbei auf Basis des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes [124] ermittelt und nach Gleichung (4.2) berechnet.

$$\Delta\Lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial\dot{q}}\Delta\dot{q}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T_{IS}}\Delta T_{IS}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T_{OS}}\Delta T_{OS}\right)^2} \quad (4.2)$$

Da, wie bereits mehrfach ausgeführt, die Wandprobenhalterung für 300 mm x 300 mm Wandkonstruktionen für flexible Versuchsdurchführungen ausgelegt ist, wurde eine entspre-

chend hohe Dämmwirkung der Seitenflächenisolierung (vgl. Abschnitt 3.2.1) gewählt, um den theoretisch eindimensionalen Wärmetransport bestmöglich zu gewährleisten. Zur Verifikation des Versuchsaufbaus beim Einsatz für ungedämmte Wandkonstruktionen werden auf beiden Oberflächen Temperatursensoren bzw. Wärmestrommessplatten appliziert, um die Eindimensionalität des Wärmestroms quantitativ bewerten zu können.

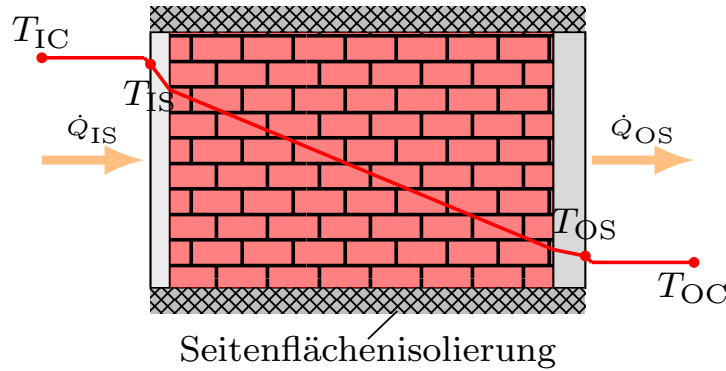


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der ein- ($\dot{Q}_{IS}$) und austretenden ($\dot{Q}_{OS}$) Wärmeströme sowie der verschiedenen Temperaturniveaus (T_{IC} , T_{IS} , T_{OS} und T_{OC}) innerhalb der ungedämmten Wandkonstruktion bei eindimensionalem Wärmetransport.

4.2.2 Parameteridentifikationsverfahren für gedämmte Wandkonstruktionen

Grundsätzlich erhöht sich durch das Anbringen einer Wärmedämmung der thermische Widerstand der Gesamtwandkonstruktion, was bei gleichbleibender Temperaturdifferenz zu einem geringeren Wärmeverlust führt. Der zusätzlich vorhandene thermische Widerstand wirkt sich außerdem auf die Richtung des Wärmetransports und die Temperaturverteilung innerhalb der zu untersuchenden Wandkonstruktion im Differenzklimakammerprüfstand aus. Abhängig vom thermischen Widerstand des verwendeten Wärmedämmmaterials erfolgt eine mehr oder weniger ausgeprägte Störung des eindimensionalen Wärmetransports, d. h. $\dot{Q}_{IS} \neq \dot{Q}_{OS}$. Für diesen Fall muss der über die Seitenflächen austretende Wärmestrom $\dot{Q}_R$, der in Abbildung 4.2 dargestellt ist, berücksichtigt werden. Aus der stationären Energiebilanz an der Wandkonstruktion ergibt sich $\dot{Q}_{IS} - \dot{Q}_{OS} = \dot{Q}_R$, was gegenüber dem eindimensionalen Fall ($T = T(x)$, $\dot{Q} = \text{const.}$) zu lokal in einer Ebene variierenden Temperaturen und Wärmeströmen führt ($T = T(x, y, z)$, $\dot{Q} = \dot{Q}(x, y, z)$). Gleichung (4.1) kann somit nicht mehr zur Bestimmung des Wärmeleitwerts verwendet werden.

Im Folgenden wird eine neu entwickelte Methodik [122] für den konzipierten Versuchsaufbau vorgestellt, die sich einem Parameteridentifikationsverfahren bedient und aus der inversen Wärmeübertragung [154] herrührt. Bei der inversen Wärmeübertragung wird, im Gegensatz zur „herkömmlichen“ Wärmeübertragung, durch Messungen (z. B. Temperaturen

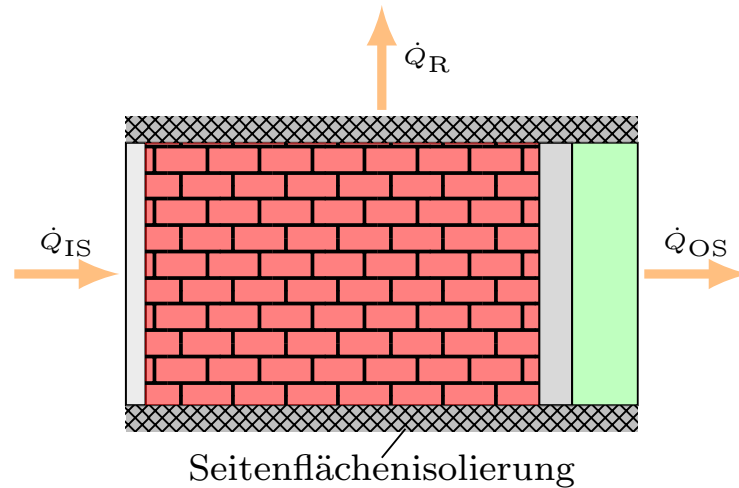


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der ein- ($\dot{Q}_{IS}$) und austretenden ($\dot{Q}_{OS}$) Wärmeströme sowie des Randwärmestromverlusts ($\dot{Q}_R$) innerhalb der gedämmten Wandkonstruktion bei dreidimensionalem Wärmetransport.

oder Wärmeströme) an einem realen Objekt, ein Rückschluss auf beispielsweise die Materialeigenschaften des untersuchten Systems gezogen. Hierzu wird, neben den gemessenen Ausgangsgrößen (Temperatur bzw. Wärmestrom), ein hinreichend genaues mathematisches Modell des Systems sowie eine Zielfunktion, mit der die Güte der Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation bewertet werden kann, benötigt.

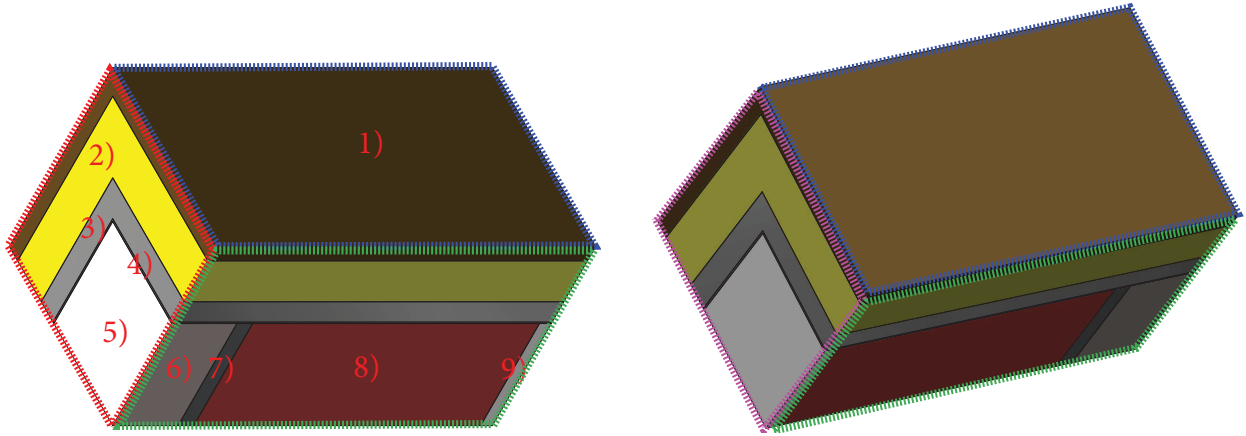
Bei dem hier entwickelten Verfahren wird der Wärmeleitwert der Wandkonstruktion entsprechend Gleichung (4.3) ermittelt.

$$\Lambda = \frac{1}{\underbrace{\sum R_{th,ui}}_{\text{ungedämmt}} + \underbrace{\delta_{is}/\lambda_{eff,is}}_{\text{Dämmung}}} \quad (4.3)$$

$\sum R_{th,ui}$ bezeichnet hierbei die bekannte Summe der flächenspezifischen thermischen Widerstände des ungedämmten Aufbaus, die z. B. in vorherigen Untersuchungen mittels Gleichung (4.1) bestimmt wird. Mithilfe des zweiten Terms ($\delta_{is}/\lambda_{eff,is}$) wird der flächenspezifische thermische Widerstand der angebrachten Dämmschicht berechnet. δ_{is} bezeichnet die bekannte Schichtstärke der Dämmung und $\lambda_{eff,is}$ die zu bestimmende, tatsächliche Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht. Diese kann, wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, insbesondere bei hygroskopischen Materialien deutlich von dem vom Hersteller angegeben Nennwert, abhängig von der Trocknungsdauer der Dämmschicht bzw. der Umgebungsluftfeuchte, abweichen. Für das Parameteridentifikationsverfahren liegt somit eine zu bestimmende Größe, die effektive Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials ($\lambda_{eff,is}$), vor.

Zur bestmöglichen Reproduktion des Temperaturfelds wurde eine dreidimensionale Geometrie der Wandkonstruktion inklusive der Wandprobenhalterung erstellt. Für die Erstel-

lung des mathematischen Modells wurde die Multiphysik-Simulationssoftware COMSOL Multiphysics® verwendet. Die Abbildungen 4.3a und 4.3b zeigen beispielhaft für WK2 (MHGK-Dämmschicht) das erstellte Simulationsmodell. In diesen Abbildungen zeigen die Frontseiten von WK2 zur Außen- bzw. Innenkammer. Bei der Modellierung kann aufgrund des symmetrischen Aufbaus der gesamten Konstruktion eine Symmetriebedingung ($-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0$) an zwei Seitenflächen appliziert werden, wodurch der numerische Berechnungsaufwand deutlich reduziert wird. $\mathbf{n}$ bezeichnet hier den nach außen gerichteten Normalenvektor und $\dot{\mathbf{q}}$ den Vektor der Wärmestromdichte.



(a) Viertel-Geometrie der Wandkonstruktion WK2 und der Wandprobenhalterung. Die Stirnseite ist zur Außenkammer gerichtet. Die Zuordnung der Nummern 1) bis 9) erfolgt in Tabelle 4.1.

(b) Viertel-Geometrie der Wandkonstruktion WK2 und der Wandprobenhalterung. Die Stirnseite ist zur Innenkammer gerichtet.

Abbildung 4.3: Geometrie des Simulationsmodells zur Parameteridentifikation der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht.

Den Stirnseiten zur Außen- bzw. Innenkammer werden konvektive Wärmeübergangsbedingungen mit entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten (h_{OS} und h_{IS}) und Lufttemperaturen (T_{OC} und T_{IC}) zugewiesen. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden über das Newtonsche Wärmeübergangsgesetz aus den Messgrößen im stationären Zustand entsprechend Gleichung (4.4) bestimmt.

$$h_{IS} = \frac{\dot{q}_{IS}}{T_{IC} - T_{IS}} \quad h_{OS} = \frac{\dot{q}_{OS}}{T_{OS} - T_{OC}} \quad (4.4)$$

Die äußere Fläche der Siebdruckplatte (Nr. 1 in Abbildung 4.3a) ist zu gleichen Teilen in beiden Kammern verortet. Dieser Fläche werden als Randbedingungen ein gemittelter Wärmeübergangskoeffizient und eine mittlere Lufttemperatur zugewiesen. Für das Parameteridentifikationsverfahren werden die Messgrößen des stationären Zustands verwendet, da hier die transienten Effekte bereits abgeklungen sind. Dies spiegelt sich mathematisch im

Wegfall des transienten Terms, der die Wärmespeicherfähigkeit (Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c_p) beinhaltet, wider, sodass die Gebietsbedingung in Form von Gleichung (4.5) verwendet werden kann.

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (4.5)$$

∇ bezeichnet hier den Nabla-Operator im dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem $([\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z]^T)$. Mittels des Fourier-Gesetzes aus Gleichung (4.6) wird die Wärmestromdichte mit dem Temperaturgradienten verknüpft, wobei die Proportionalitätskonstante der Wärmeleitfähigkeit (λ) entspricht.

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla T \quad (4.6)$$

Tabelle 4.1 ordnet den Nummern in Abbildung 4.3a die entsprechenden Materialien und Wärmeleitfähigkeiten zu, die für das Parameteridentifikationsverfahren verwendet werden. Zudem erfolgt eine Zuordnung der in den Abbildungen 4.3a und 4.3b farblich umrandeten Oberflächen zu den entsprechenden mathematischen Randbedingungen.

Tabelle 4.1: Bezeichnungen, Materialien und Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten aus Abbildung 4.3a. Zudem sind die farblich umrandeten Oberflächen den mathematischen Randbedingungen zugeordnet.

Nr.	Material	λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Referenz
1)	Siebdruckplatte	0,17	[130]
2)	XPS	0,034	[129]
3)	Vakuum-Isolations-Paneel	0,007	[128]
4)	PMMA	0,19	[155]
5)	Armierungsputz und Deckschicht	0,39	[138]
6)	Wärmedämmputz	tbi ¹⁷	-
7)	Kalk-Zementputz	0,85	[134]
8)	Vollziegelmauerwerk	0,72	Messung
9)	Kalk-Gipsputz	0,7	[133]

Farbe	Rot	Blau
Randbed.	$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{OS}} (T_{\text{OC}} - T)$	$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = (h_{\text{OS}} + h_{\text{IS}}) / 2 ((T_{\text{OC}} + T_{\text{IC}}) / 2 - T)$
Farbe	Grün	Violett
Randbed.	$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0$	$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{IS}} (T_{\text{IC}} - T)$

In der Zielfunktion, die als Entscheidungskriterium im Parameteridentifikationsverfahren dient, werden die auf beiden Seiten der Wandprobe gemessenen bzw. numerisch berechneten Wärmestromdichten verwendet. Dies bietet den Vorteil, dass hierdurch direkt die ein- und

¹⁷Bestimmung mittels Parameteridentifikationsverfahren.

austretenden Energieströme der Wandkonstruktion berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 4.2). Diese Vorgehensweise ermöglicht somit eine ganzheitliche Betrachtung der Wandkonstruktionen bei gleichzeitig geringem messtechnischen Aufwand. In der Zielfunktion (TF) aus Gleichung (4.7) werden die Differenzen aus experimentell (exp) und numerisch (num) ermittelten Wärmestromdichten auf der Wandinnen- (IS) und -außenseite (OS) im Sinne einer Least Squares Minimierung verwendet.

$$\lambda_{\text{eff,IS}} = \underset{\text{TF}}{\operatorname{argmin}} \left((\dot{q}_{\text{exp,IS}} - \dot{q}_{\text{num,IS}})^2 + (\dot{q}_{\text{exp,OS}} - \dot{q}_{\text{num,OS}})^2 \right) \quad (4.7)$$

Auf diese Weise werden größere Abweichungen von gemessenen und simulierten Wärmestromdichten stärker gewichtet und tragen somit zu einer überproportionalen Zunahme des Absolutwerts der Zielfunktion bei. Die Bestimmung dieser Zielfunktion wird in einem definierten, abgeschlossenen Intervall von Wärmeleitfähigkeiten $[\lambda_{\text{start}}, \lambda_{\text{end}}]$ durchgeführt, wobei jedes Mal eine Berechnung des mathematischen Modells mit der aktuellen Wärmeleitfähigkeit erfolgt. Aus dem Verlauf der Zielfunktion $\text{TF}(\lambda)$ wird beim Minimum die effektive Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht ($\lambda_{\text{eff,IS}}$) bestimmt. Abbildung 4.4 zeigt in Form eines Flussdiagramms den gesamten Prozess zur Ermittlung des Verlaufs der Zielfunktion $\text{TF}(\lambda)$ für das Parameteridentifikationsverfahren. Als zentrale Schnittstelle und zur Kommunikation mit COMSOL Multiphysics® wird hierbei MATLAB® eingesetzt.

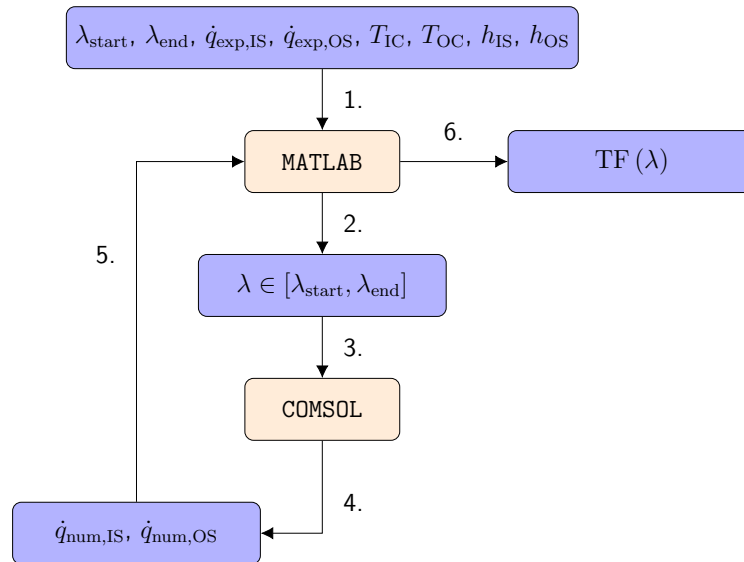


Abbildung 4.4: Flussdiagramm zur Bestimmung des Verlaufs der Zielfunktion $\text{TF}(\lambda)$ des entwickelten Parameteridentifikationsverfahrens.

4.2.3 Experimentelle Versuchsbedingungen

Für die Verifikation der in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Methoden wird für erstere die Wandkonstruktion WK1 (vgl. Abschnitt 3.3.2) und für letztere die Wandkonstruktion WK2 bzw. WK3 verwendet (vgl. Abschnitt 3.3.3 bzw. 3.3.4). Auf den Stirnseiten aller untersuchten Wandkonstruktionen wurden im Versuchsaufbau Temperatursensoren und Wärmestrommessplatten zur Erfassung der Oberflächentemperaturen (T_{IS} bzw. T_{OS}) und Wärmestromdichten ($\dot{q}_{IS}$ bzw. $\dot{q}_{OS}$) appliziert. Aufgrund des hygroskopischen Verhaltens der Dämmschicht von WK2 bzw. WK3 wurde nach der Herstellung der Wandkonstruktionen eine Trocknungszeit im Labor von drei Monaten eingehalten, bevor mit den Untersuchungen begonnen wurde. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten durch die bei der Herstellung eingebrachte Feuchtigkeit nicht erhöht sind. Für die ungedämmte Wandkonstruktion WK1 wurde eine Lufttemperaturdifferenz (ΔT_{IC-OC}), wie in Tabelle 4.2 aufgeführt, zur Ermittlung des Wärmeleitwerts verwendet. Bei den gedämmten Wandaufbauten WK2 und WK3 wurden, zur Verifikation der Robustheit der neu entwickelten Methodik, je Wandkonstruktion drei unterschiedliche Lufttemperaturdifferenzen (WK2- i bzw. WK3- i mit $i = 1 \dots 3$) genutzt. Die Versuchsbedingungen für die gedämmten Varianten umfassen hierbei Lufttemperaturdifferenzen von ca. 20 K bis 40 K. Die konkreten Zahlenwerte sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Lufttemperaturen im Innen- (T_{IC}) und Außenbereich (T_{OC}) zur Ermittlung des Wärmeleitwerts bzw. der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht.

	T_{IC} in °C	T_{OC} in °C	ΔT_{IC-OC} in K
WK1	29,0	-9,9	38,9
WK2-1	28,1	-9,4	37,5
WK2-2	23,4	-4,7	28,1
WK2-3	20,8	1,6	19,2
WK3-1	28,9	-10,3	39,2
WK3-2	23,8	-5,4	29,2
WK3-3	21,1	1,6	19,5

4.3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird zunächst der experimentell mittels der Methode aus Abschnitt 4.2.1 ermittelte Wärmeleitwert der ungedämmten Wandkonstruktion (WK1) vorgestellt. Im Anschluss werden detailliert die Ergebnisse der neu entwickelten Methodik aus Abschnitt 4.2.2

zur Bestimmung der Wärmeleitwerte der gedämmten Wandkonstruktionen WK2 und WK3 dargestellt.

4.3.1 Wärmeleitwert der ungedämmten Wandkonstruktion

Der Lufttemperaturunterschied zwischen dem Innen- ($29,0^\circ\text{C}$) und Außenbereich ($-9,9^\circ\text{C}$) führt zu einem Wärmestrom durch die Wandkonstruktion, der in Richtung der Außenwand gerichtet ist. Im stationären Zustand wurden auf der Innen- bzw. Außenwand der Wandkonstruktion WK1 Oberflächentemperaturen von $23,2^\circ\text{C}$ bzw. $-5,2^\circ\text{C}$ gemessen. Auf der Innenseite der Wandkonstruktion wurde eine Wärmestromdichte von $52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und auf der Außenseite von $49,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ experimentell ermittelt. Hieraus ergibt sich eine mittlere Wärmestromdichte von $\left(52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 49,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) / 2 = 50,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Obwohl das Verhältnis der Differenz der Messwerte zum Mittelwert bezogen auf den Mittelwert $(1,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} / 50,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 2,6 \%)$ geringer als die Messunsicherheit der Wärmestrommessplatten ist ($\pm 5 \% \text{ v. M.}$), kann, trotz der hohen Dämmwirkung der Seitenflächenisolierung, anhand der dargestellten Messergebnisse davon ausgegangen werden, dass auch bei WK1 geringe Randwärmeverluste auftreten. Durch die Oberflächentemperaturdifferenz von $(23,2 - (-5,2)) \text{ K} = 28,4 \text{ K}$ und die mittlere Wärmestromdichte von $50,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ergibt sich, entsprechend Gleichung (4.1), ein Wärmeleitwert der dreischichtigen Wandkonstruktion WK1 von $(1,79 \pm 0,06) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

4.3.2 Wärmeleitwert bei gedämmten Wandkonstruktionen

Zunächst werden die auf Basis des Flussdiagramms aus Abbildung 4.4 ermittelten Ziel-funktionen $TF(\lambda)$ für die gedämmten Wandkonstruktionen dargestellt. Weiterhin erfolgt die Bestimmung des Wärmeleitwerts sowie der Vergleich der ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten mit Herstellerangaben und mit nachträglich an einer Einzelschicht für den MHGK-Dämmputz durchgeführten Messungen [156]. Im Anschluss wird die Verifikation des entwickelten Verfahrens anhand eines Vergleichs zwischen den experimentellen und berechneten Wärmestromdichten und Oberflächentemperaturen vorgenommen.

4.3.2.1 Identifikation der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht wurden für WK2 und WK3 Intervalle der Wärmeleitfähigkeit ($[\lambda_{\text{start}}, \lambda_{\text{end}}]$) von $0,03 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bis $0,05 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $0,02 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bis $0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ verwendet. Diese Bereiche sind jeweils, zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Verfahrens, breit um die von den Herstellern angegebenen Werte der Wärmeleitfähigkeit für den trockenen Zustand [54, 53] gelegt. Nach dreimonatiger Trocknungsdauer der Wandkonstruktionen wird davon ausgegangen, dass die Dämmschichten von WK2 bzw. WK3 nahezu Wärmeleitfähigkeiten in der Größenordnung der Herstellerangaben erreicht haben. Bei unbekannten Materialien oder Feuchtegehalten kann das Verfahren auch über größere

Wertebereiche von Wärmeleitfähigkeiten ($[\lambda_{\text{start}}, \lambda_{\text{end}}]$) angewandt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der resultierenden Funktionen erfolgt eine Normierung der Zielfunktion aus Gleichung (4.7) auf das jeweils auftretende Minimum. Abbildung 4.5 veranschaulicht die normierte Zielfunktion entsprechend Gleichung (4.8) für die Wandkonstruktionen WK2 und WK3 bei den Lufttemperaturdifferenzen ($i = 1 \dots 3$) aus Tabelle 4.2.

$$\text{TF}_n = \frac{(\dot{q}_{\text{exp,IS}} - \dot{q}_{\text{num,IS}})^2 + (\dot{q}_{\text{exp,OS}} - \dot{q}_{\text{num,OS}})^2}{\left[(\dot{q}_{\text{exp,IS}} - \dot{q}_{\text{num,IS}})^2 + (\dot{q}_{\text{exp,OS}} - \dot{q}_{\text{num,OS}})^2 \right]_{\min}} \quad (4.8)$$

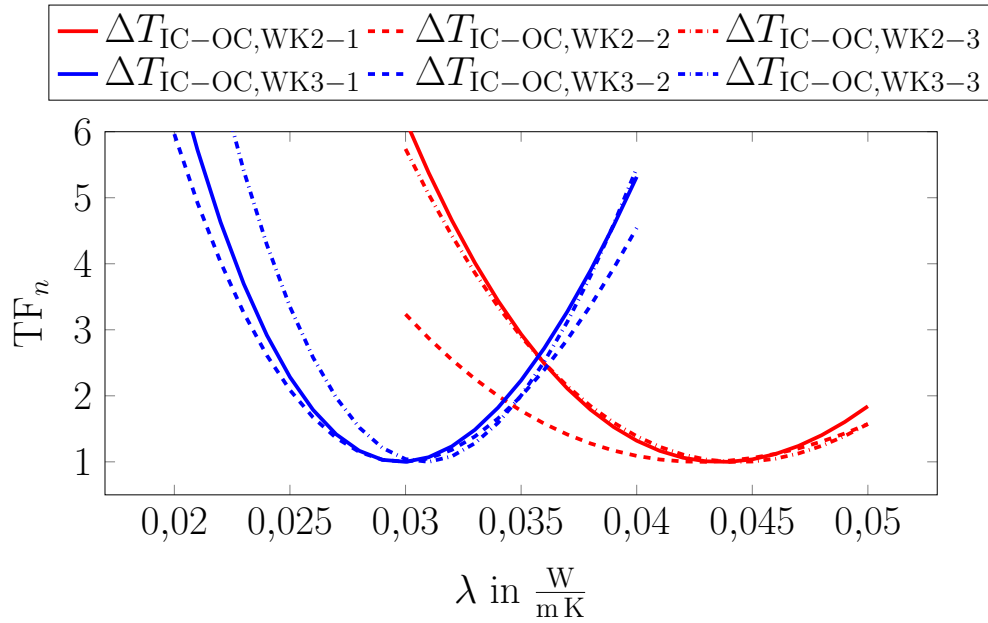


Abbildung 4.5: Normierte Zielfunktion (TF_n) in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht der Wandkonstruktionen WK2 und WK3 für jeweils drei verschiedene Lufttemperaturdifferenzen.

Sowohl bei den Zielfunktionen der mit MHGK-Dämmputz versehenen Wandkonstruktion WK2 als auch bei denen des Wandaufbaus WK3 mit Aerogel-Dämmputz handelt es sich um parabolische Funktionsverläufe mit mehr oder weniger stark ausgeprägten Minima. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, sind im Fall von WK2 die Funktionsverläufe im Bereich der jeweiligen Minima flacher und bei WK3 steiler. Allgemein sind steilere Funktionsverläufe bei Minimierungsproblemstellungen zu bevorzugen, da hierdurch die Eindeutigkeit der Lösung des Parameteridentifikationsverfahrens erhöht wird. Tabelle 4.3 listet die mittels der entwickelten Methodik identifizierten effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Dämmschicht ($\lambda_{\text{eff, is}, i}$), die über die Minima der zugehörigen Funktionen für jede Lufttemperaturdifferenz bestimmt wurden, auf. Weiterhin sind die Mittelwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Dämmschichten ($\bar{\lambda}_{\text{eff, is}}$) für WK2 und WK3 sowie die nach Gleichung (4.3) berechneten

Wärmeleitwerte (Λ) aufgeführt. Sowohl für die Wandkonstruktion mit MHGK-Dämmputz als auch für die mit Aerogel-Dämmschicht liefert das Verfahren, unabhängig von der von außen auf den Wandaufbau einwirkenden Lufttemperaturdifferenz, nahezu die gleichen effektiven Wärmeleitfähigkeiten. Für WK2 ergibt sich aus den drei Untersuchungen ein Mittelwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $0,044 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ und für WK3 von $0,030 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Vergleicht man diese Zahlenwerte mit den Herstellerangaben für den MHGK-Dämmputz ($\lambda_B = 0,042 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $\lambda_D = 0,040 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [54]) und den Aerogel-Dämmputz ($\lambda_B = 0,030 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $\lambda_D = 0,028 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [53]), kann mit der vorgestellten Methodik eine sehr gute Übereinstimmung¹⁸ erzielt werden. Mittels Gleichung (4.3) kann der Wärmeleitwert der Wandkonstruktionen WK2 und WK3 zu $0,42 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bzw. $0,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bestimmt werden. Im Vergleich zur ungedämmten Wandkonstruktion WK1 ($1,79 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$) ermöglicht die Applikation einer 8 cm MHGK-Dämmputzschicht oder einer 5 cm Aerogel-Dämmputzschicht eine Reduktion des Wärmeleitwerts um 76,5 % bzw. 74,9 % gegenüber der ungedämmten Variante.

Tabelle 4.3: Mittels des Parameteridentifikationsverfahrens bestimmte Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht ($\lambda_{\text{eff, is}, i}$) für jede Lufttemperaturdifferenz, berechnete mittlere Wärmeleitfähigkeit ($\bar{\lambda}_{\text{eff, is}}$) und ermittelter Wärmeleitwert (Λ) für die Wandkonstruktionen WK2 und WK3 .

	$\lambda_{\text{eff, is}, 1}$ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\lambda_{\text{eff, is}, 2}$ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\lambda_{\text{eff, is}, 3}$ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\bar{\lambda}_{\text{eff, is}}$ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Λ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
WK2	0,044	0,043	0,044	0,044	0,42
WK3	0,030	0,030	0,031	0,030	0,45

4.3.2.2 Validierung des Parameteridentifikationsverfahrens

Wie in Abschnitt 4.3.2.1 anhand von WK2 und WK3 veranschaulicht, wurden die effektiven Wärmeleitfähigkeiten über das entwickelte Parameteridentifikationsverfahren ermittelt und hinsichtlich der Qualität der Übereinstimmung mit den Herstellerangaben verglichen. Grundvoraussetzung für den Vergleich war hierbei eine lange Trocknungszeit (hier: drei Monate), in der sich die hygroskopischen Materialien dem trockenen Zustand annähern konnten. Werden allerdings z. B. Untersuchungen bei hoher Luftfeuchte über längere Zeiträume oder während des Trocknungsprozesses durchgeführt, muss die Beurteilung der ermittelten Wärmeleitfähigkeit über den Vergleich der experimentellen mit den simulativ berechneten Größen erfolgen.

In den Abbildungen 4.6 und 4.7 sind die gemessenen (exp) und für den Mittelwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit numerisch berechneten (num) Wärmestromdichten auf der

¹⁸Eine nachträglich separat durchgeführte Vermessung einer Platte des MHGK-Dämmputzes mit einer Schichtstärke von 8 cm ergab eine Wärmeleitfähigkeit von $(0,045 \pm 0,020) \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [156].

Wandinnen- (IS) bzw. Wandaußenseite (OS) für die jeweiligen Temperaturdifferenzen (WK2- i bzw. WK3- i mit $i = 1 \dots 3$) aus Tabelle 4.2 dargestellt. Mit zunehmender Lufttemperaturdifferenz zwischen dem Außen- und Innenbereich erhöht sich die Differenz zwischen den gemessenen innen- und außenseitigen Wandwärmestromdichten von $3,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ für WK2-3 auf $6,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ für WK2-1. Die gemessenen Wärmestromdichten auf der Wandaußenseite von WK2 sind für alle untersuchten Konfigurationen höher und diejenigen auf der Wandinnenseite geringer als die numerisch berechneten Wärmestromdichten. Dies bedeutet im konkreten Fall eine geringfügige Überschätzung des Wärmestroms durch die Seitenflächenisolierung. Die absoluten mittleren Abweichungen der Wärmestromdichten betragen $1,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $1,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und $0,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ für WK2-1, WK2-2 und WK2-3 im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen.

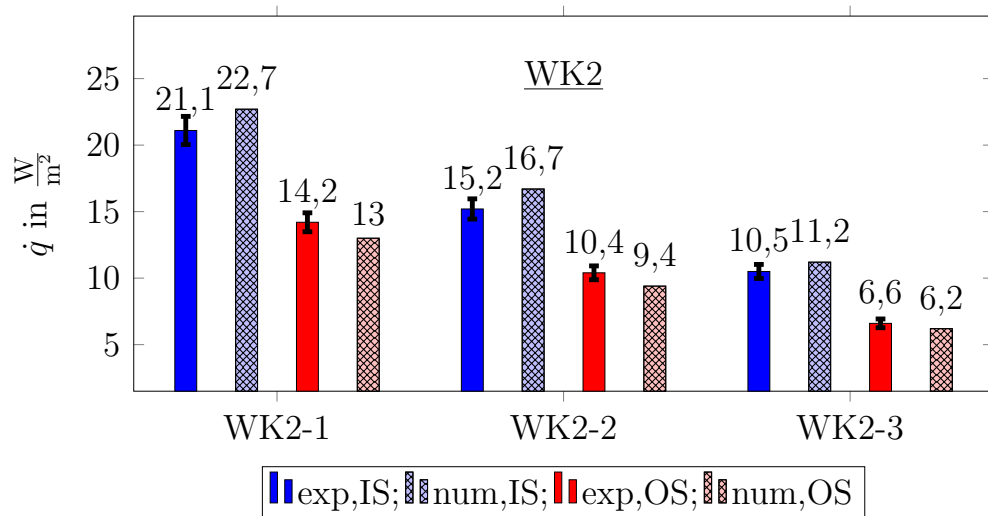


Abbildung 4.6: Gemessene (exp) und numerisch berechnete (num) Wärmestromdichte auf der Wandinnen- (IS) bzw. Wandaußenseite (OS) für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht von WK2 aus Tabelle 4.3 in Abhängigkeit von den Lufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 4.2.

Im Gegensatz zu WK2 werden für WK3 die numerisch berechneten Seitenflächenwärmeströme leicht unterschätzt, da hier die Differenz der Wärmestromdichten zwischen der Wandinnen- und Wandaußenseite, wie aus Abbildung 4.7 ersichtlich, geringer ausfällt als für die Experimente. Die mittleren Abweichungen betragen für die vorliegenden Untersuchungen $1,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und $0,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ für WK3-1, WK3-2 und WK3-3 und fallen somit geringer aus als die für WK2. Die mittlere relative Abweichung für die drei Temperaturdifferenzen beträgt für WK2 und WK3, bezogen auf die experimentellen Untersuchungen, 7,9 % bzw. 6,6 %.

Als zusätzliche Validierungsmöglichkeit können die experimentellen und numerisch ermittelten Oberflächentemperaturen auf beiden Seiten der Wandkonstruktion herangezogen werden. Die Abbildungen 4.8a und 4.8b zeigen beispielhaft für die Lufttemperaturdifferenz WK2-3 ($T_{\text{IC}} = 20,8^\circ\text{C}$ und $T_{\text{OC}} = 1,6^\circ\text{C}$) die berechneten Oberflächentemperaturen auf der Wandinnen- und Wandaußenseite. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass die Störung der

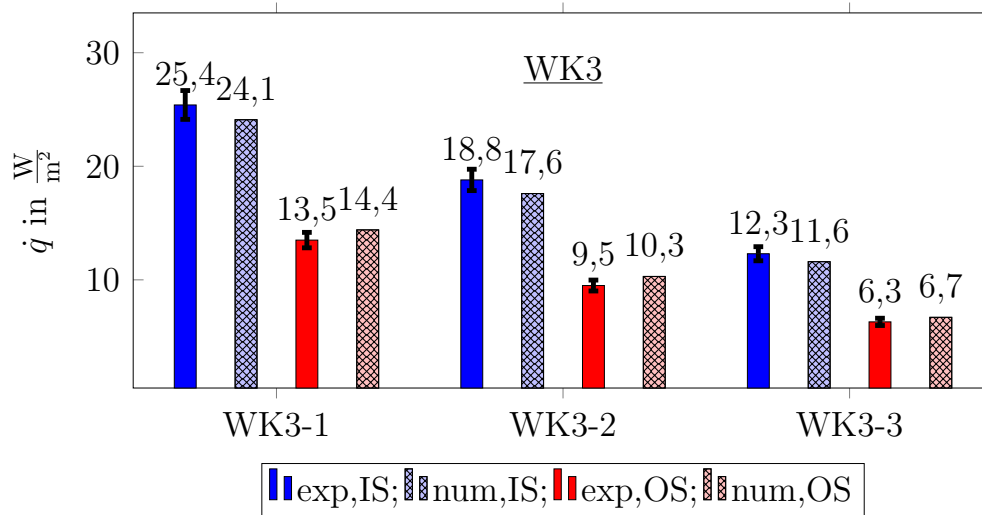


Abbildung 4.7: Gemessene (exp) und numerisch berechnete (num) Wärmestromdichte auf der Wandinnen- (IS) bzw. Wandaußenseite (OS) für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht von WK3 aus Tabelle 4.3 in Abhängigkeit von den Lufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 4.2.

eindimensionalen Natur des Temperaturfelds von innen nach außen zunimmt, was zu größeren lokalen Differenzen der Oberflächentemperaturen und somit zu einem Unterschied in der Wärmestromdichte zwischen den beiden Seiten der Wandkonstruktion ($10,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ vs. $6,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) führt. Für den vorliegenden Fall WK2-3 betragen die gemessenen Oberflächentemperaturen auf der Wandinnen- und -außenseite $19,8^\circ\text{C}$ bzw. $3,3^\circ\text{C}$ und stimmen exzellent mit den simulierten Temperaturen von $19,8^\circ\text{C}$ bzw. $3,2^\circ\text{C}$ überein.

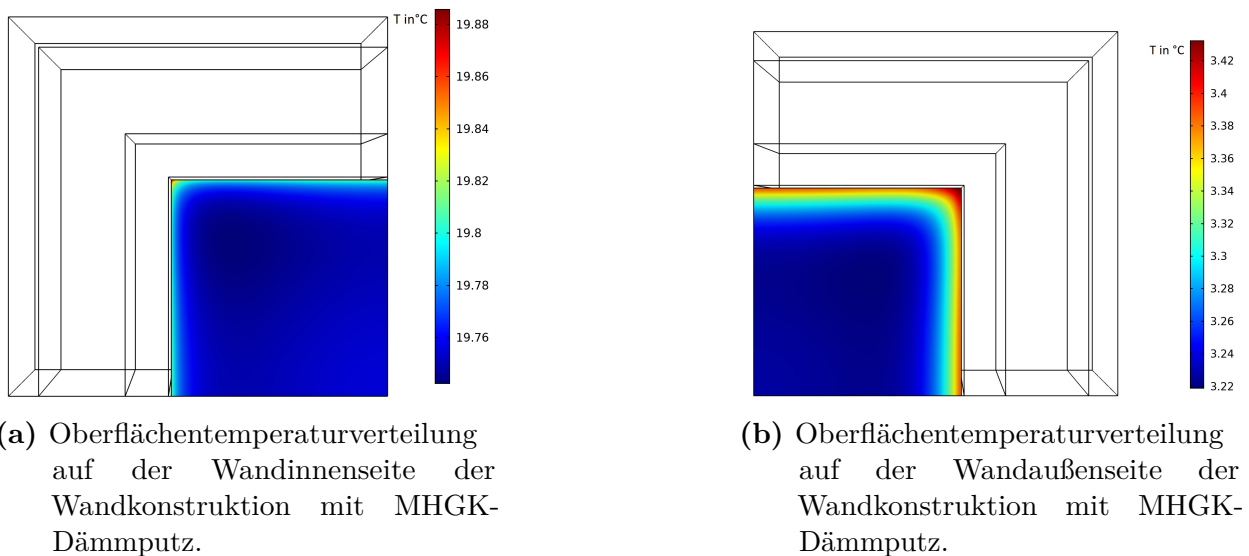


Abbildung 4.8: Oberflächentemperaturverteilung auf der Wandinnen- (a) und Wandaußenseite (b) für die Wandkonstruktion WK2 bei der Lufttemperaturdifferenz WK2-3 aus Tabelle 4.2 für den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit aus Tabelle 4.3.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden für den konzipierten Differenzklimakammerprüfstand Verfahren zur Ermittlung des Wärmeleitwerts für ungedämmte und gedämmte Wandkonstruktionen vorgestellt und anhand der drei Wandkonstruktionen WK1 (ungedämmt), WK2 (MHGK-Dämmputz) und WK3 (Aerogel-Dämmputz) verifiziert. Der Wärmeleitwert der ungedämmten Wandkonstruktion wurde durch eindimensionale Betrachtung des Wärmestroms durch den Wandaufbau experimentell zu $(1,79 \pm 0,06) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bestimmt.

Für die gedämmten Wandkonstruktionen WK2 und WK3 wurde eine neue Methodik entwickelt, bei der ein Parameteridentifikationsverfahren zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht eingesetzt und hiermit der Wärmeleitwert des Gesamtwandaufbaus bestimmt wird. Hierfür wird ein detailliertes virtuelles Modell in Kombination mit Prüfstandsuntersuchungen und einer eigens definierten Zielfunktion benötigt. Zur Veranschaulichung der Robustheit der Methodik wurde das Verfahren für WK2 und WK3 bei je drei Lufttemperaturdifferenzen angewandt. Dabei konnte eine exzellente Übereinstimmung der für WK2 und WK3 bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeiten von $0,044 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $0,030 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ mit den Herstellerangaben (MHGK: $\lambda_B = 0,042 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $\lambda_D = 0,040 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [54]; Aerogel: $\lambda_B = 0,030 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bzw. $\lambda_D = 0,028 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [53]) erzielt werden. Die errechneten Wärmeleitwerte betragen $0,42 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (WK2) und $0,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (WK3). Weiterhin wurden Möglichkeiten zur Validierung der ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten gezeigt, indem ein Vergleich von experimentell und numerisch ermittelten Wärmestromdichten bzw. Oberflächentemperaturen auf der Wandinnen- und Wandaußenseite gezogen wird. Hierbei ergaben sich, im Fall der Wärmestromdichten, mittlere Abweichungen über die jeweiligen untersuchten Lufttemperaturdifferenzen zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen von 7,9 % (WK2) und 6,6 % (WK3).

5 Verfahren zur Messung des solaren Gewinns im Wandprüfstand

In diesem Kapitel werden ein stationäres und ein dynamisches Verfahren zur Ermittlung des solaren Gewinns von transparenten Wärmedämmsystemen bzw. Wandkonstruktionen im Differenzklimakammerprüfstand vorgestellt. Anschließend werden die experimentellen Ergebnisse detailliert präsentiert und diskutiert.

5.1 Zielsetzung

Transparente Wärmedämmsysteme werden oftmals hinsichtlich ihres thermischen und strahlungstechnischen Verhaltens in experimentellen Vorrichtungen getrennt untersucht (vgl. Abschnitt 2.3.3). Für den in Kapitel 3.2 vorgestellten Prüfstands Aufbau wird, am Beispiel des solar selektiven Wärmedämmsystems, ein entwickeltes stationäres kalorimetrisches Verfahren präsentiert, welches zur experimentellen Untersuchung transparenter Wärmedämmsysteme und zur Bestimmung des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrads (g) angewandt werden kann.

Bei realen Wandkonstruktionen treten beim Einsatz transparenter Wärmedämmsysteme gleichzeitig dynamische Wärme- und Strahlungstransportvorgänge auf. Das bedeutet, die konvektive Wärmeabgabe der absorbierten Strahlung zur Umgebung, die Einspeicherung der Solarenergie in die Massivwand, die Reduktion des Wärmeverlusts und die Wärmeleitung zur Wandinnenseite treten in Kombination auf. Diese Phänomene beeinflussen sich gegenseitig und hängen zudem von den anliegenden Umweltrandbedingungen (z. B. Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenluft, Solarstrahlungsintensität, -dauer und -einstrahlwinkel) ab.

Aus diesem Grund wurde für den konzipierten Prüfstand, zusätzlich zum stationären Verfahren für transparente Wärmedämmsysteme, ein dynamisches Verfahren zur Untersuchung von Wandkonstruktionen unter Definition der oben genannten Umweltrandbedingungen entwickelt. Zur Durchführung quantitativer Vergleiche zwischen verschiedenen Wandkonstruktionen werden eigens für die dynamischen Untersuchungen entwickelte Leistungskenngrößen eingeführt und begründet. Diese Leistungskenngrößen werden für verschiedene Einstrahlwinkel für die Wandkonstruktionen WK1 (ungedämmt), WK2 (MHGK-Dämmputz) und WK4 (solar selektives Wärmedämmsystem) bestimmt und miteinander verglichen, wodurch gleichzeitig das Potential der neu entwickelten Fassadenkonstruktion (WK4) gezeigt wird.

Weiterhin wird zur Untersuchung des Einflusses der Latentwärmespeicherung sowie der zeitlichen Verschiebung und Dämpfung des nach innen gerichteten Wärmestroms auf den solaren Gewinn die Wandkonstruktion WK5 mittels des dynamischen Verfahrens vermessen und mit WK4 verglichen.

5.2 Entwickelte Messverfahren

Zunächst wird das entwickelte stationäre kalorimetrische Testverfahren für transparente Wärmedämmsysteme zur Bestimmung des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrads präsentiert [156]. Anschließend wird das neu entwickelte dynamische Testverfahren zur Ermittlung des solaren Gewinns von Wandkonstruktionen [122] mit eigens hierfür definierten Leistungskenngrößen vorgestellt, die für einen quantitativen Vergleich verschiedener Wandkonstruktionen verwendet werden. Im Nachgang werden die experimentellen Versuchsbedingungen vorgestellt, bei denen das solarselektive Wärmedämmsystem bzw. die Wandkonstruktionen WK1, WK2, WK4 und WK5 untersucht wurden.

5.2.1 Stationäre kalorimetrische Vermessung

Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g) eines transparenten Wärmedämmsystems umfasst die direkte Transmission von Solarstrahlung (τ_e) sowie die sekundäre Wärmeabgabe nach innen (q_i) durch z. B. langwellige Wärmestrahlung und Konvektion und wird entsprechend Gleichung (5.1) bestimmt [157].

$$g = \tau_e + q_i \quad (5.1)$$

Bei experimentellen Verfahren zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrads in Prüfstandsbauteilen [81] wird entweder eine hinter dem Prüfkörper angeordnete, gekühlte Platte („Cooled Plate“) oder eine gekühlte Box („Cooled Box“) eingesetzt. Wird beispielsweise das „Cooled Plate“-Verfahren angewandt, kann der experimentell ermittelte Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{exp}) aus dem Verhältnis der Wärmestromdichte auf der gekühlten Platte ($\dot{q}_{\text{IS}}$) zur Solarstrahlungsintensität ($I_{\text{S},\perp}$) nach Gleichung (5.2) bestimmt werden.

$$g_{\text{exp}} = \frac{\dot{q}_{\text{IS}}}{I_{\text{S},\perp}} \quad (5.2)$$

In dem für den Differenzklimakammerprüfstand entwickelten Verfahren [156] wird auf der Rückseite des Prüfkörpers ein schwarz lackiertes Stahlblech mit darauf befindlichem Messsystem montiert, welches die Wärmestromdichte ($\dot{q}_{\text{IS}}$) durch das transparente Wärmedämmsystem sowie die Oberflächentemperatur (T_{abs}) auf der Rückseite des Prüfkörpers erfasst (vgl. Abbildung 5.1). Das Verfahren wird am Beispiel des solarselektiven Wärmedämmsystems angewandt und verwendet die in [17] vorgeschlagenen Innen- und Außenlufttemperaturen

($T_{IC} = T_{OC} = 20\text{ °C}$) für die Untersuchungen bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ).

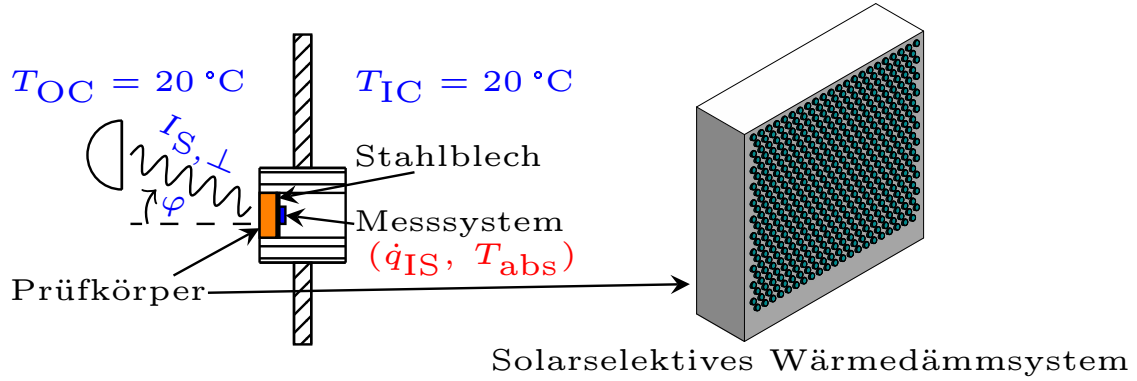


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des kalorimetrischen Testverfahrens zur Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrads am Beispiel des solarselektiven Wärmedämmsystems. Die Umweltrandbedingungen sind blau, die Messgrößen rot markiert.

Unter Verwendung der gemessenen stationären Wärmestromdichte ($\dot{q}_{IS}$) und Absorbertemperatur (T_{abs}) auf dem Stahlblech kann eine Energiebilanz entsprechend Gleichung (5.3) auf der Wandinnenseite aufgestellt werden.

$$\dot{q}_{IS} = g_{exp} I_{S,\perp} - (T_{abs} - T_{OC}) / \sum R_{th,abs-OC} \quad (5.3)$$

In Gleichung (5.3) bezeichnet g_{exp} den unter den oben genannten Randbedingungen definierten experimentell ermittelten Gesamtenergiedurchlassgrad und $I_{S,\perp}$ die Solarstrahlungsintensität senkrecht zur Einfallrichtung. $\sum R_{th,abs-OC}$ wird nach Gleichung (5.4) bestimmt und umfasst die Summe der thermischen Widerstände zwischen der Absorberplatte und der Luft in der Außenkammer.

$$\sum R_{th,abs-OC} = \underbrace{\frac{\delta}{\lambda_{eff}}}_{\text{Prüfkörper}} + \underbrace{\frac{1}{h_{OC}}}_{\text{Luft}} \quad (5.4)$$

Zur Bestimmung des thermischen Widerstands des Prüfkörpers δ/λ_{eff} (hier: SATIS) wird die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) des entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystems benötigt. In den hier durchgeführten Untersuchungen wird λ_{eff} schrittweise, d. h. in den verschiedenen Herstellungsstadien des SATIS-Paneels, experimentell ermittelt. In Stadium 1 (vgl. Abbildung 5.2a) befindet sich das Paneel im ungebohrten, in Stadium 2 im gebohrten (vgl. Abbildung 5.2b) und in Stadium 3 (vgl. Abbildung 5.2c) im gebohrten und mit Glaszylindern bestückten Zustand. In den Stadien 1 und 2 wird das Paneel in der Wandprobenhalterung platziert und von beiden Seiten mit jeweils einem Stahlblech mit vernachlässigbarem thermischen Widerstand fixiert (vgl. Abbildung 5.2d). Diese Stahlbleche werden zur Homogenisierung der Temperaturen und für die Befestigung der Sensoren verwendet. Durch die Applikation von

zwei Wärmestrommessplatten können die ein- und austretenden Wärmestromdichten erfasst werden, wodurch die Eindimensionalität¹⁹ des Wärmeflusses bewertet werden kann. In den Stadien 1 und 2 kann die effektive Wärmeleitfähigkeit anhand von Gleichung (5.5) bestimmt werden, in der δ die Plattendicke (SATIS: (80 ± 2) mm) bezeichnet.

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{(\dot{q}_{\text{IS}} + \dot{q}_{\text{OS}})/2}{T_{\text{IS}} - T_{\text{OS}}} \delta \quad (5.5)$$

Die Messunsicherheit wird nach Gleichung (5.6) (Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz [124]) bestimmt.

$$\Delta \lambda_{\text{eff}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda_{\text{eff}}}{\partial \dot{q}_{\text{IS}}} \Delta \dot{q}_{\text{IS}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_{\text{eff}}}{\partial \dot{q}_{\text{OS}}} \Delta \dot{q}_{\text{OS}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_{\text{eff}}}{\partial T_{\text{IS}}} \Delta T_{\text{IS}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_{\text{eff}}}{\partial T_{\text{OS}}} \Delta T_{\text{OS}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_{\text{eff}}}{\partial \delta} \Delta \delta\right)^2} \quad (5.6)$$

In Stadium 3 des solarselektiven Wärmedämmsystems kann auf der Außenseite, aufgrund der herausragenden Glaszylinder, kein Stahlblech bzw. keine Sensorik appliziert werden, weshalb nur die Messgrößen auf der Innenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$, T_{IS}) zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 5.2e). Dies führt dazu, dass Gleichung (5.5) nicht zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit verwendet werden kann.

Im stationären Zustand und bei konstanter Oberflächentemperaturdifferenz ($T_{\text{IS}} - T_{\text{OS}}$) besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Wärmestromdichte und der Wärmeleitfähigkeit entsprechend Gleichung (5.7).

$$\lambda = \underbrace{\frac{\delta}{T_{\text{IS}} - T_{\text{OS}}}}_{\text{const.}} \dot{q} \rightarrow \lambda \sim \dot{q} \quad (5.7)$$

Für das entwickelte Verfahren müssen in den drei Stadien die gleichen Kammerlufttemperaturen (T_{IC} , T_{OC}) und Lufttemperaturdifferenzen ($\Delta T_{\text{IC-OC}}$) vorliegen. Unter der Annahme gleichbleibender Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Seiten (nahezu unveränderte Oberflächentemperaturdifferenz) kann Gleichung (5.7) auch für das solarselektive Wärmedämmsystem in allen Stadien verwendet werden. Somit kann λ_{eff} in Stadium 3 durch die Skalierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Stadien 1 und 2 mit den gemessenen Wärmestromdichten auf der Wandinnenseite in Stadium 3 und anschließender Mittelung entsprechend Gleichung (5.8) bestimmt werden.

$$\lambda_{\text{eff},3} = \left(\frac{\dot{q}_{\text{IS},3}}{\dot{q}_{\text{IS},2}} \lambda_{\text{eff},2} + \frac{\dot{q}_{\text{IS},3}}{\dot{q}_{\text{IS},1}} \lambda_{\text{eff},1} \right) / 2 \quad (5.8)$$

¹⁹Die maximale Abweichung der Eindimensionalität betrug 3,3 % und der Mittelwert lag bei 2,6 %.

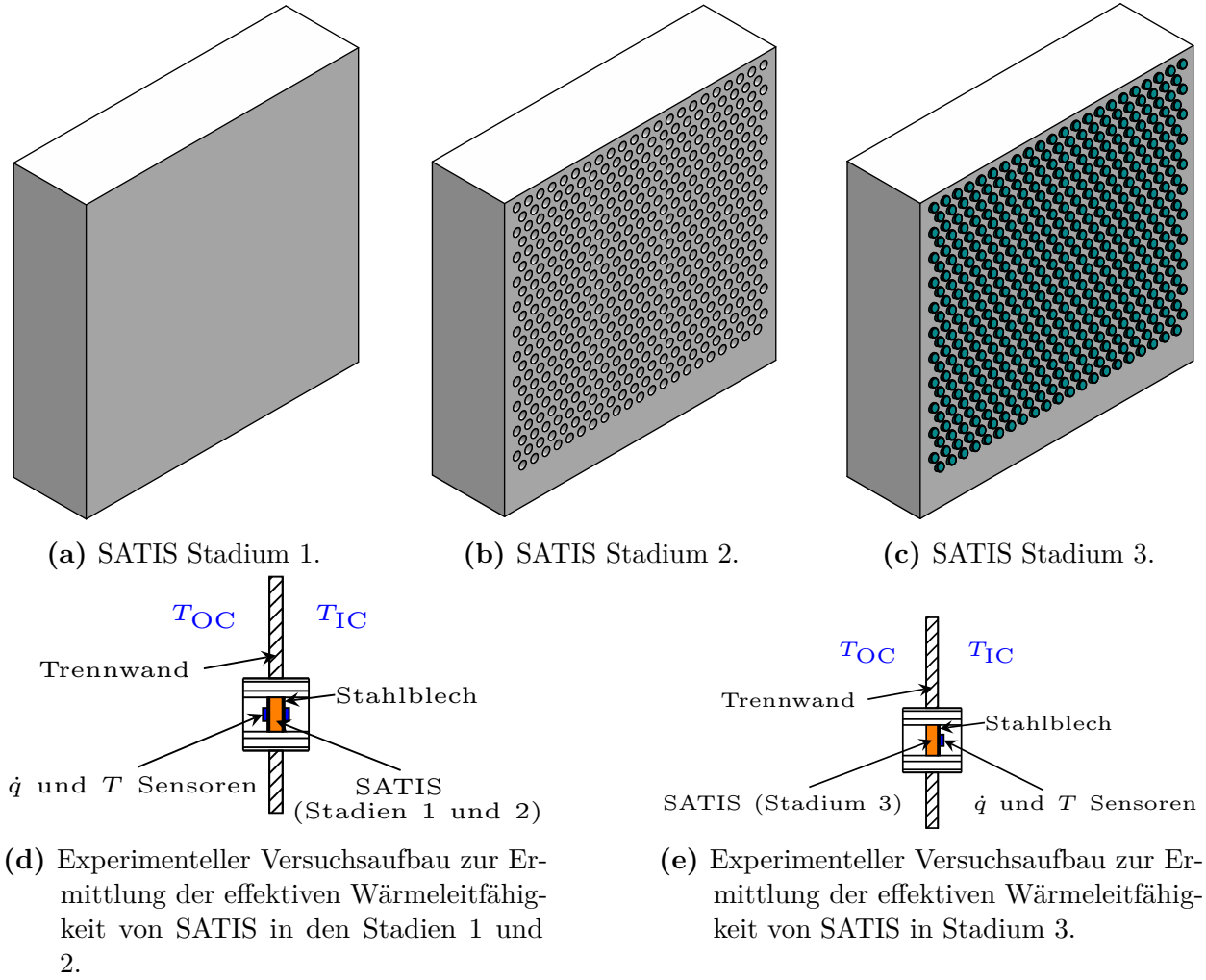


Abbildung 5.2: Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems (SATIS) und experimentelle Versuchsaufbauten.

Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt analog zu Gleichung (5.6). $\lambda_{\text{eff},3}$ wird in Gleichung (5.4) zur Bestimmung des thermischen Widerstands des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 verwendet. Das Auflösen von Gleichung (5.3) führt zur Bestimmungsgleichung (5.9) für g_{exp} .

$$g_{\text{exp}} = \frac{\overbrace{\dot{q}_{\text{IS}} + (T_{\text{abs}} - T_{\text{OC}}) / \sum R_{\text{th,abs-OC}}}^{\text{Wärmeverlust zur Außenluft}}}{I_{\text{S},\perp}} \quad (5.9)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient auf der Wandaußenseite (h_{OC}) in Gleichung (5.4) wird, auf Basis der Ergebnisse anderer Untersuchungen [122], zu $14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ gesetzt²⁰, da diese Größe für SATIS in Stadium 3 (herausragende Glaszylinder) nicht ermittelt werden kann.

²⁰Eine Analyse in Gleichung 5.9 zeigt, dass die relative Änderung von g_{exp} nur 0,3 % beträgt, wenn der Wärmeübergangskoeffizient halbiert ($7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$) bzw. verdoppelt ($28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$) wird.

5.2.2 Dynamisches Testverfahren und Leistungskenngrößen

Das stationäre Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 liefert ausschließlich quantitative Informationen zum transparenten Wärmedämmsystem. Zur Berücksichtigung der Energiespeicherfähigkeit des gesamten Wandaufbaus wurde ein dynamisches Verfahren entwickelt [122], welches für die in der folgenden Aufzählung genannten Schritte im Entwicklungsprozess benötigt wird:

1. Untersuchung des dynamischen Verhaltens einer Wandkonstruktion bei verschiedenen Einstrahlwinkeln.
2. Vergleich unterschiedlicher Wandkonstruktionen bei einem Einstrahlwinkel.
3. Validierung der entwickelten dynamischen Simulationsmodelle (Kapitel 6).

Die für dieses Verfahren definierten Leistungskenngrößen sind ausschließlich für die oben genannten Schritte verwendbar und erlauben keine quantitativen Aussagen über die solaren Gewinne oder Transmissionswärmeverluste von Wandkonstruktionen unter realen Umweltbedingungen. Ein jährlicher energetischer Vergleich verschiedener Wandkonstruktionen wird anhand der validierten numerischen Modelle in Kapitel 7 durchgeführt.

Grundsätzlich erhöht Solarstrahlung als ein von außen auf die Wandkonstruktion einwirkender Wärmestrom die Temperaturen innerhalb des Schichtaufbaus und führt somit zu einer Erhöhung der inneren Energie. Somit steht durch die eingespeicherte Energie ein Mittel zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs zur Verfügung. Für das Testverfahren ist es von zentraler Bedeutung, die Auswirkungen der einfallenden Solarstrahlung hinsichtlich der Energiespeicherung und des -transports messtechnisch zu erfassen, um somit den konkreten solaren Gewinn (z. B. weniger benötigte Raumheizung) bestimmen zu können.

Für den Differenzklimakammerprüfstand und dessen Komponenten aus Kapitel 3 wurde ein Testverfahren entwickelt, dessen wesentliche Einflussgrößen in einer schematischen Darstellung in Abbildung 5.3 veranschaulicht sind. In den vorliegenden Untersuchungen können die Umweltrandbedingungen T_{IC} (Lufttemperatur innen), T_{OC} (Lufttemperatur außen), $I_{S,\perp}$ (Solarstrahlungsintensität senkrecht zur Einfallsrichtung) und φ (Höhen- bzw. Polarwinkel der Solarstrahlung) beeinflusst werden.

Es werden somit vier unabhängige Umweltrandbedingungen im konkreten Testverfahren eingesetzt. Die prinzipiellen Entwicklungstätigkeiten in dieser Arbeit betreffen die solarselektive Wandkonstruktion (WK4, vgl. Abschnitt 3.3.5), bei der unter geringen Einstrahlwinkeln solare Gewinne erzielt werden sollen. Diese Gewinne sollen durch die Dämmung über einen längeren Zeitraum im Massivmauerwerk gespeichert werden und somit den stationären Wärmeverlust (z. B. in Wintermonaten) bestmöglich reduzieren. Aus diesem Grund wurden die nachfolgend dargestellten Leistungskenngrößen sowie die Versuchsbedingungen für dieses Szenario ($T_{IC} = \text{const.} > T_{OC} = \text{const.}$, stationärer Wärmeverlust von innen nach außen) definiert.

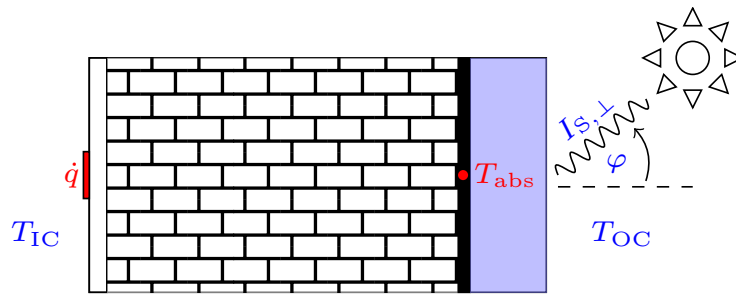


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Testverfahrens zur Ermittlung der solaren Gewinne am Beispiel der solar selektiven Wandkonstruktion. Die Umwelt-randbedingungen sind blau, die Messgrößen rot markiert.

Im Testverfahren werden beide Kammerlufttemperaturen (T_{IC} und T_{OC}) auf einen konstanten Wert (21 °C bzw. 2 °C) eingestellt und somit die untersuchte Wandkonstruktion in einen stationären Zustand gebracht. Anschließend erfolgt die Bestrahlung der Wandoußenseite mit dem Solarsimulator über einen definierten Zeitraum bei gleichbleibendem Einstrahlwinkel (φ) und konstanter Solarstrahlungsintensität senkrecht zur Einfallsrichtung ($I_{s,\perp}$). Nach Bestrahlungsende wird der Versuch bis zum erneuten Erreichen des stationären Ausgangszustands der Wandkonstruktion fortgesetzt. Die messtechnische Bewertung der Wärmeeinspeicherung in das Mauerwerk und des Wärmetransports zur Wandinnenseite erfolgt durch die in Abbildung 5.3 dargestellten Sensoren. Es handelt sich um einen in der Absorberschicht bzw. hinter der Dämmschicht liegenden Temperatursensor (T_{abs}) und eine auf der Wandinnenseite befestigte Wärmestrommessplatte ($\dot{q}$). Diese beiden Messgrößen werden zur Bestimmung der vier eigens definierten Leistungskenngrößen für das entwickelte Testverfahren verwendet. Anhand dieser Leistungskenngrößen müssen, für gegebene Strahlungs- und Lufttemperaturrandbedingungen, folgende Fragestellungen beantwortet werden können:

- Welche akkumulierte Energiemenge wird mit der Zeit durch das Dämmsystem geleitet und in die Absorber-Klebeschicht eingespeichert?
- Welche zeitliche Änderung der inneren Energie in der Absorberschicht ist erzielbar?
- Wie groß (absolut) ist die zur Wandinnenseite geleitete Solarenergie, die den Wärmeverlust reduziert?
- In welchem (prozentualen) Maß kann die Solarstrahlung zur Reduktion des Wärmeverlusts auf der Wandinnenseite beitragen (=relative zeitliche Energieeinsparung)?

Die nachfolgend präsentierten Leistungskenngrößen sollen diese Fragestellungen beantworten und somit einen quantitativen Vergleich für die untersuchten Wandkonstruktionen liefern. Beim ersten Leistungsindikator handelt es sich um die zeitabhängige Temperaturerhöhung in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (TR) während der kontinuierlichen Bestrahlung

durch den Solarsimulator. Diese Kenngröße wird durch Gleichung (5.10) bestimmt.

$$\text{TR} = T_{\text{abs}} - T_{\text{abs,st}} \quad (5.10)$$

Hierin bezeichnet T_{abs} die momentane Temperatur und $T_{\text{abs,st}}$ die zum Zeitpunkt des Bestrahlungsbeginns vorliegende stationäre Temperatur, die sich aus der anliegenden Kammerlufttemperaturdifferenz ($T_{\text{IC}} - T_{\text{OC}}$) und der jeweiligen Wandkonstruktion ergibt. Mittels der Temperaturerhöhung wird implizit die Fragestellung a), d. h. die Frage nach der akkumulierten Energiemenge in der Absorberschicht, beantwortet. Bei sensibel wärmespeichernden Materialien, wie beispielsweise Vollziegeln, ist die kalorische Zustandsgröße der inneren Energie (U) mit der Temperatur (T) über $U = mc_p T$ verknüpft. Bei konstanter Masse (m) und spezifischer Wärmekapazität (c_p) ist somit die Temperaturerhöhung gegenüber einem Referenzzustand (hier: stationärer Zustand) direkt proportional zur Erhöhung der inneren Energie gegenüber diesem Ausgangszustand ($U_{\text{abs}} - U_{\text{abs,st}} = mc_p \text{TR}$). Betrachtet man den zeitlichen Verlauf von TR in der Absorberschicht, dann erhält man die akkumulierte Energiemenge mit der Zeit gegenüber dem Referenzzustand. Für das solarselektive Wärmedämmsystem gilt beispielsweise, dass ein guter Solarstrahlungstransport und eine hohe Dämmwirkung zu größeren Temperaturerhöhungen in der Absorberschicht (TR) führen.

Die Temperaturerhöhungsrate (TRR) als zweite Leistungskenngröße ist der zeitliche Gradient der Temperaturerhöhung und wird mittels Gleichung (5.11) berechnet.

$$\text{TRR} = \frac{d\text{TR}}{dt} = \frac{dT_{\text{abs}}}{dt} \quad (5.11)$$

Durch die Temperaturerhöhungsrate wird die Fragestellung b) nach der zeitlichen Änderung der inneren Energie in der Absorberschicht aufgegriffen. Wird die Systemgrenze um die Absorberschicht gelegt, dann kann mit dem ein- ($\dot{Q}_{\text{abs,ein}}$) und austretenden ($\dot{Q}_{\text{abs,aus}}$) Wärmestrom die zeitliche Änderung der inneren Energie bzw. die TRR entsprechend Gleichung (5.12) bestimmt werden.

$$\frac{dU}{dt} = mc_p \frac{dT_{\text{abs}}}{dt} = mc_p \text{TRR} = \dot{Q}_{\text{abs,ein}} - \dot{Q}_{\text{abs,aus}} \quad (5.12)$$

Der Fokus liegt, am Beispiel der solarselektiven Wärmedämmung, auf einer hohen TRR für geringe Sonnenstände, da in kurzen Zeiträumen um die Mittagszeit nahezu optimale Einstrahlbedingungen vorliegen, sodass hier möglichst viel Energie eingespeichert werden soll. Für hohe Sonnenstände soll dieser Leistungsindikator zur Vermeidung sommerlicher Überhitzungseffekte möglichst gering sein.

Der dritte Leistungsindikator ermöglicht die Ermittlung der absoluten solaren Energiemenge, die auf der Wandinnenseite für eine Reduktion des stationären Wärmeverlusts sorgt.

Mit dem solaren Gewinn (SG), welcher nach Gleichung (5.13) berechnet wird, kann somit Fragestellung c) behandelt werden.

$$\text{SG} = \int_{t_I}^{t_{II}} (\dot{q}_{\text{st}} - \dot{q}) dt = q_{\text{st}} - q \quad (5.13)$$

Eine beispielhafte Darstellung eines typischen Funktionsverlaufs der gemessenen Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite sowie der für Gleichung (5.13) benötigten Größen ist in Abbildung 5.4 veranschaulicht. Sobald die Wandkonstruktion im Versuchsaufbau den Beharrungszustand erreicht hat, liegt eine stationäre Wärmestromdichte ($\dot{q}_{\text{st}}$) vor. Einige Zeit nach dem Bestrahlungsbeginn durch den Solarsimulator (t_I) reduziert sich die momentane Wärmestromdichte ($\dot{q}$) gegenüber $\dot{q}_{\text{st}}$ aufgrund der absorbierten und zur Wandinnenseite geleiteten Solarstrahlung. Der Anstieg bis zum erneuten Erreichen des stationären Zustands (t_{II}) hängt hierbei von den Dämm- und Speichereigenschaften der jeweiligen Wandkonstruktion ab. Der solare Gewinn (SG) entspricht somit der über einen definierten Zeitraum gegenüber dem stationären Fall eingesparten Wärmemenge (vgl. Abbildung 5.4).

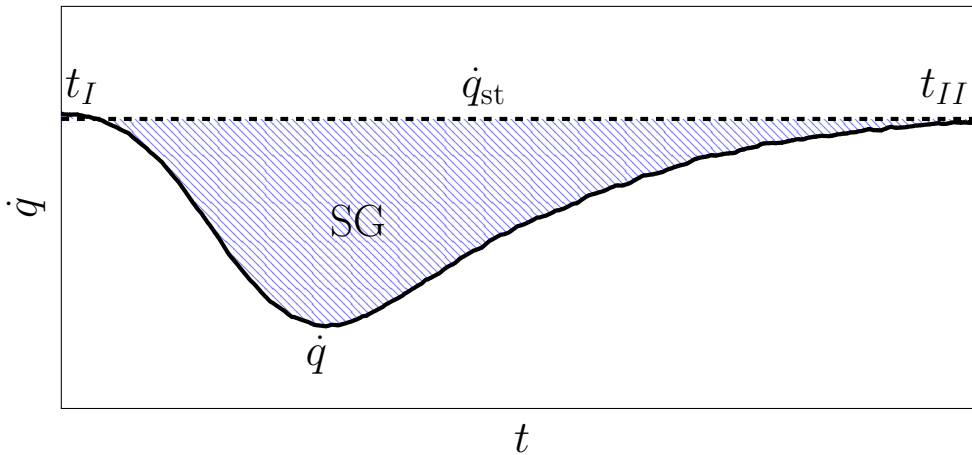


Abbildung 5.4: Beispielhafte Darstellung eines typischen Funktionsverlaufs der Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}$) während des dynamischen Testverfahrens zur Ermittlung des solaren Gewinns (SG) und Wärmeverlustreduktionsfaktors (HLRF).

Der vierte Leistungsindikator, der Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) nach Gleichung (5.14), ermöglicht die Beantwortung der Fragestellung d) nach der relativen zeitlichen Energieeinsparung auf der Wandinnenseite aufgrund der einfallenden Solarstrahlung.

$$\text{HLRF} = 1 - \frac{\int_{t_I}^{t_{II}} \dot{q} dt}{\int_{t_I}^{t_{II}} \dot{q}_{\text{st}} dt} = 1 - \frac{\int_{t_I}^{t_{II}} \dot{q} dt}{\dot{q}_{\text{st}} (t_{II} - t_I)} = 1 - \frac{q}{q_{\text{st}}} = \frac{\text{SG}}{q_{\text{st}}} \quad (5.14)$$

Hierbei liefert das Verhältnis von solarem Gewinn (SG) zu stationärem Wärmeverlust (q_{st}) die relative Energieeinsparung auf der Wandinnenseite durch die Solarstrahlung. Je größer

der HLRF ist, desto mehr Solarenergie (SG) konnte auf die Wandinnenseite geleitet bzw. im Massivmauerwerk gespeichert werden. Zudem trägt auch ein gutes Dämmvermögen (geringer q_{st}), welches den Wärmeverlust durch die Dämmschicht reduziert, zur Erhöhung des HLRF bei.

5.2.3 Experimentelle Versuchsbedingungen

Die folgenden Paragraphen beinhalten die Versuchsbedingungen für das stationäre (Abschnitt 5.2.1) und das dynamische (Abschnitt 5.2.2) Testverfahren zur Charakterisierung der solaren Eigenschaften des solarselektiven Wärmedämmsystems bzw. der Wandkonstruktionen.

Stationäre Untersuchungen

Zur Ermittlung der für das stationäre Verfahren notwendigen effektiven Wärmeleitfähigkeit wurde das Paneel des solarselektiven Wärmedämmsystems in den drei Herstellungsstadien bei jeweils drei verschiedenen Temperaturdifferenzen vermessen (vgl. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Gemessene Innen- (T_{IC}) und Außenlufttemperaturen (T_{OC}) sowie absolute Temperaturdifferenzen ($\Delta T_{\text{IC-OC}}$) zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der SATIS Paneele in den drei Herstellungsstadien.

SATIS Stadium	T_{IC} in °C	T_{OC} in °C	$\Delta T_{\text{IC-OC}}$ in K
1 - exp. 1	19,0	-0,7	19,7
1 - exp. 2	23,7	-5,6	29,3
1 - exp. 3	28,3	-10,6	38,9
2 - exp. 1	19,0	-0,6	19,6
2 - exp. 2	23,7	-5,4	29,1
2 - exp. 3	28,3	-10,6	38,9
3 - exp. 1	19,0	-0,4	19,4
3 - exp. 2	23,6	-5,2	28,8
3 - exp. 3	28,3	-10,3	38,6

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert, werden die Untersuchungen zur Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrads bei konstanten Innen- und Außenlufttemperaturen von 20 °C [17] durchgeführt. Das entwickelte solarselektive Wärmedämmsystem soll ein äußerst winkelsensitives Verhalten um den Auslegungswinkel (19°) aufweisen. Aus diesem Grund wurde im Bereich dieses Bestpunkts eine hohe Winkelauflösung bei den Untersuchungen vorgesehen. Mit zunehmendem Einstrahlwinkel wurde der Abstand zwischen den untersuchten Winkeln vergrößert. Tabelle 5.2 listet die untersuchten Einstrahlwinkel (φ) und die dazugehörige gemessene Solarstrahlungsintensität senkrecht zur Einfallsrichtung ($I_{\text{S},\perp}$) auf.

Tabelle 5.2: Untersuchte Einstrahlwinkel (φ) und gemessene Strahlungsintensität senkrecht zur Einfallrichtung ($I_{S,\perp}$) des solar selektiven Wärmedämmsystems.

φ in °	$I_{S,\perp}$ in $\frac{W}{m^2}$	φ in °	$I_{S,\perp}$ in $\frac{W}{m^2}$
0	1070	24	1090
14	1110	30	1100
17	1100	35	1060
19	1060	45	1040
21	1090	60	940

Dynamische Untersuchungen

Das entwickelte Testverfahren aus Abschnitt 5.2.2 wurde in den experimentellen Untersuchungen für das Szenario $T_{IC} = \text{const.} > T_{OC} = \text{const.}$ (Winterfall) auf die ungedämmte (WK1), die herkömmlich gedämmte (WK2) sowie die solar selektive Wandkonstruktion ohne (WK4) und mit PCM-Schicht (WK5) angewandt. Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 erwähnt, soll das Verfahren ausschließlich für den Vergleich verschiedener Wandkonstruktionen und zur Validierung von Simulationsmodellen eingesetzt werden. Es ermöglicht keine quantitative Aussage über die tatsächliche Energieeinsparung von Wandkonstruktionen unter realen Umweltbedingungen.

In den experimentellen Untersuchungen wird die Strahlung des Solarsimulators bei den jeweiligen Einstrahlwinkeln über acht Stunden mit einer Solarstrahlungsintensität von rund einer Sonne ($1000 \frac{W}{m^2}$) auf der Wandaußenseite aufgebracht. Die hohe Strahlungsintensität wurde gewählt, um aufgrund des geringen Absorptionsgrads der verwendeten Außenfarbe (vgl. Abschnitt 3.3.2) im Prüfstand einen gut messbaren Effekt (Temperaturerhöhung in der Absorberschicht und Reduktion der Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite) für die verschiedenen Wandkonstruktionen zu erzielen. Hinzu kommt, dass die Validierung dynamischer Simulationsmodelle mit den durchgeführten Experimenten ebenfalls von hohen Anregeimpulsen profitiert. Die Strahlungsintensitäten wurden zu Beginn jedes Experiments mit einer Solar-Referenzzelle ($\pm 3\%$) gemessen, die vom Hersteller des Solarsimulators bereitgestellt wurde. Die Referenzzelle besteht aus einer 20 mm x 20 mm großen PV-Zelle, die mit einem Temperatursensor in einem Metallgehäuse untergebracht ist.

In Tabelle 5.3 sind die gemessenen Umweltrandbedingungen aus Abbildung 5.3 für den jeweiligen Wandaufbau aufgelistet. Für den Einstrahlwinkel von WK1 wurde ein Winkel von 0° gewählt, da hier, entsprechend dem Lambertschen Kosinusetz²¹, die maximale Strahlungsintensität auf der Wandaußenseite, und somit das Maximum an aufgenommener Energie, erreichbar ist. WK2 wurde unter einem Winkel von 19° bestrahlt, um hierdurch einen direkten Vergleich zum Auslegungspunkt der solar selektiven Wandkonstruktion WK4

²¹Trifft die Solarstrahlung nicht senkrecht (0°) sondern unter einem Winkel (φ) auf die Oberfläche, so verringert sich die auftreffende Strahlungsdichte um $\cos(\varphi)$.

(vgl. Anstellwinkel Bohrungen aus Abschnitt 3.3.5) durchführen zu können. Zur Überprüfung der Winkelabhängigkeit des solaren Gewinns von WK4, welche allein durch den konstruktiven Aufbau erreicht werden soll, wurden bei diesem Wandaufbau vier Einstrahlwinkel getestet. Hierbei handelt es sich um die Winkel von 19° , 24° und 30° als Repräsentanten für geringe Sonnenstände, bei denen hohe solare Gewinne erzielt werden sollen, sowie um einen Winkel von 50° , bei dem ein möglichst geringer Solarenergieeintrag vorhanden sein soll. Allen Versuchen liegen Lufttemperaturen im Innen- und Außenbereich von rund 21°C bzw. 2°C zugrunde, um einen stationären Wärmeverlust von innen nach außen zu erzeugen, der durch die eindringende Solarstrahlung mehr (19° , 24° und 30°) oder weniger (50°) stark reduziert werden soll. Zur Untersuchung des Einflusses der PCM-Schicht auf die dynamischen Leistungskenngrößen und zum direkten Vergleich mit WK4 wurde WK5 bei einem Einstrahlwinkel von 19° vermessen.

Tabelle 5.3: Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), Lufttemperaturen im Innen- (T_{IC}) und Außenbereich (T_{OC}) sowie die Strahlungsintensität auf einer Fläche senkrecht zur Einfallrichtung ($I_{\text{S},\perp}$) zur Ermittlung des solaren Gewinns für verschiedene Wandkonstruktionen.

	φ in $^\circ$	T_{IC} in $^\circ\text{C}$	T_{OC} in $^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{IC-OC}}$ in K	$I_{\text{S},\perp}$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
WK1	0	21,2	2	19,2	1060
WK2	19	20,8	1,6	19,2	1060
WK4	19	21,3	1,4	19,9	1050
WK4	24	21,3	1,7	19,6	1000
WK4	30	21,3	1,6	19,7	1000
WK4	50	21,3	1,5	19,8	980
WK5	19	21,0	1,7	19,3	1000

5.3 Ergebnisse und Diskussion

In den kommenden Abschnitten werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des Gesamtenergiedurchlassgrads des solar-selektiven Wärmedämmsystems sowie die erzielten solaren Gewinne der Wandkonstruktionen WK1, WK2, WK4 und WK5 ausführlich präsentiert und diskutiert.

5.3.1 Effektive Wärmeleitfähigkeit und Gesamtenergiedurchlassgrad der stationären Untersuchung

Tabelle 5.4 zeigt die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme auf der Wandinnen- (T_{IS} , $\dot{q}_{IS}$) und -außenseite (T_{OS} , $\dot{q}_{OS}$) von SATIS für die Herstellungsstadien 1, 2 und 3 bei den untersuchten Temperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1. Weiterhin sind in dieser Tabelle die über die Gleichungen (5.5) und (5.8) ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten dargestellt. Für das Stadium 1 beträgt die gemittelte effektive Wärmeleitfähigkeit $(45 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$, was in sehr guter Übereinstimmung mit dem Wert von $44 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ ist [122], der in diesem Prüfstand an einem Gesamtwandaufbau mit Hilfe des entwickelten Parameteridentifikationsverfahrens ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 4.3.2). Im Vergleich zu Stadium 1 wurden in Stadium 2 höhere effektive Wärmeleitfähigkeiten ermittelt und es kann ein Anstieg von $(48 \pm 3) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ bei der niedrigsten Temperaturdifferenz auf $(50 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ bei der höchsten Temperaturdifferenz experimentell beobachtet werden. In Stadium 3 erhöht sich gemäß Tabelle 5.4 die gemittelte effektive Wärmeleitfähigkeit auf $(57 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ aufgrund der eingebrachten Borosilikatglaszylinder. Hieraus kann der Wärmeleitwert des SATIS-Prototyps zu $(0,71 \pm 0,03) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bzw. der U -Wert (vgl. Abbildung 2.10a) zu $(0,64 \pm 0,02) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bestimmt werden.

Tabelle 5.4: Gemessene Temperaturen und Wärmestromdichten auf der Wandinnen- (T_{IS} , $\dot{q}_{IS}$) und -außenseite (T_{OS} , $\dot{q}_{OS}$) sowie berechnete effektive Wärmeleitfähigkeiten für jedes Herstellungsstadium gemäß den Gleichungen (5.5) und (5.8).

SATIS Stadium	T_{IS} in °C	T_{OS} in °C	$\dot{q}_{IS}$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$\dot{q}_{OS}$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	λ_{eff} in $\frac{\text{mW}}{\text{mK}}$
1 - exp. 1	17,61	2,14	8,4	8,9	45 ± 3
1 - exp. 2	21,46	-2,30	13,2	13,7	45 ± 2
1 - exp. 3	25,29	-6,80	18,1	18,6	46 ± 2
2 - exp. 1	17,47	2,07	9,0	9,3	48 ± 3
2 - exp. 2	21,34	-2,09	14,0	14,5	49 ± 3
2 - exp. 3	25,15	-6,47	19,5	19,8	50 ± 2
3 - exp. 1	17,22	-	10,7	-	$(57+57)/2=57 \pm 2$
3 - exp. 2	20,88	-	16,4	-	$(57+56)/2=57 \pm 2$
3 - exp. 3	24,56	-	22,6	-	$(58+57)/2=58 \pm 2$

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass das Bohren zu einem Anstieg der gemittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $(45 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ (Stadium 1) auf $(49 \pm 3) \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ (Stadium 2) führt. Durch die Einbringung der Stufenbohrungen kann, neben der Wärmeleitung im MHGK-Wärmedämmputz, auch ein Wärmetransport durch Konvektion und Wärmestrahlung innerhalb der Luftzylinder stattfinden. Detaillierte Untersuchungen zu den relativen Beiträgen der drei Wärmetransportmechanismen zur gesamten effektiven Wärmeleitfähigkeit werden anhand eines numerischen Modells in Kapitel 6 durchgeführt.

Abbildung 5.5 zeigt den experimentell ermittelten Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{exp}) des Prototyps des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 nach Gleichung (5.9) für die in Tabelle 5.2 aufgeführten Einstrahlwinkel (φ). Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass das Maximum des Gesamtenergiedurchlassgrads, welches im Auslegungspunkt bei 19° liegt, $11,2\%$ (vgl. Abbildung 2.10b) beträgt. Ausgehend von diesem Bestpunkt hin zu höheren bzw. geringeren Einstrahlwinkeln erfolgt eine im Vergleich zu bekannten transparenten Wärmedämmmaterialien (vgl. Abbildung 2.8) deutliche Abnahme des Gesamtenergiedurchlassgrads und demzufolge des solaren Gewinns. Beim höchsten untersuchten Einstrahlwinkel von 60° beträgt g_{exp} nur noch $2,9\%$, was einer Abnahme von 75% gegenüber dem Bestpunkt entspricht. Dieses winkelsensitive Verhalten zeigt das Potential des Systems, welches die Lichtleitung auf einen geringen Winkelbereich um den variabel gestaltbaren Auslegungspunkt beschränkt, um der sommerlichen Überhitzung bei hohen Sonnenständen ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Verschattungseinrichtungen effektiv entgegenzuwirken.

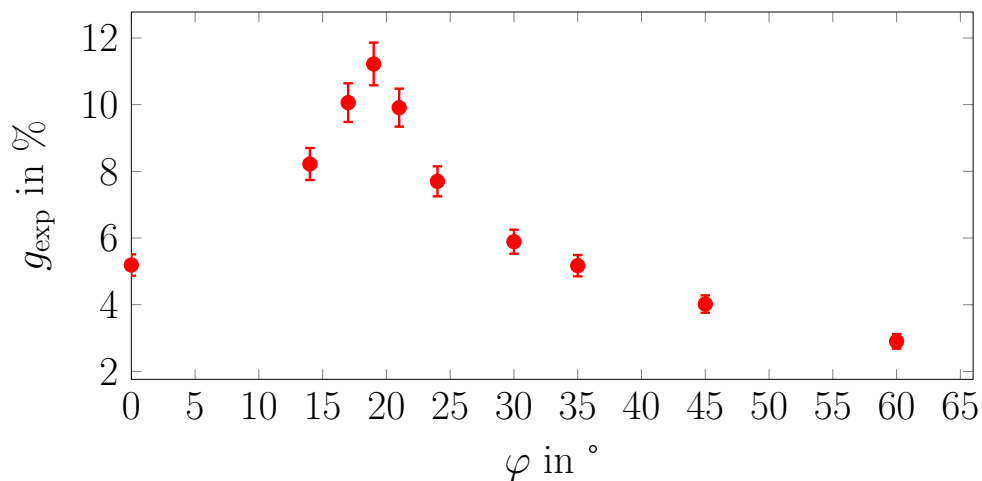


Abbildung 5.5: Experimentell ermittelter Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{exp}) des solarselektiven Wärmedämmsystems für verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

In den folgenden Abschnitten 5.3.2 und 5.3.3 werden die Ergebnisse der thermischen und strahlungstechnischen Untersuchung bei der Applikation dieses Systems an einem Vollziegelmauerwerk als Energiespeicher detailliert vorgestellt.

5.3.2 Temperaturanstieg und -anstiegsrate der dynamischen Untersuchung

Zunächst werden die beiden Leistungsindikatoren, die sowohl eine quantitative Aussage über die Erhöhung der inneren Energie in der Absorberschicht (Temperaturerhöhung TR nach Gleichung (5.10)) als auch über deren zeitliche Änderung (Temperaturerhöhungsrate TRR nach Gleichung (5.11)) ermöglichen, für WK1, WK2 und WK4 vorgestellt. Für WK1 (ungedämmt) wird aufgrund der fehlenden Dämmung die Temperaturerhöhung der Außenoberfläche gegenüber dem stationären Zustand ($T_{\text{OS}} - T_{\text{OS,st}}$) zu Vergleichszwecken dargestellt. Während des

Bestrahlungsvorgangs von WK1 wurde, aufgrund der unterschiedlichen Absorptionsgrade des applizierten Temperatursensors und der Wandfarbe, auf Messungen mit einer Thermografiekamera ($\varepsilon = 0.93$, $T_{\text{Umgebung}} = T_{\text{OC}}$) zurückgegriffen. Während des Abklingvorgangs in den stationären Zustand wurde die aufgenommene Zeitreihe der Außenoberflächentemperatur von WK1 verwendet. Tabelle 5.5 listet die zu Bestrahlungsbeginn vorliegenden stationären Temperaturen in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht ($T_{\text{abs,st}}$) auf.

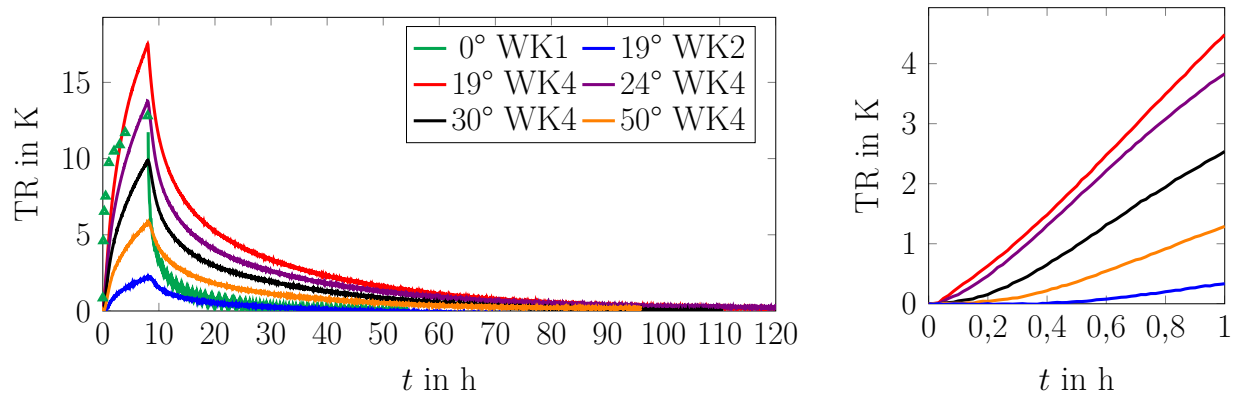
Tabelle 5.5: Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), stationäre Absorbertemperatur ($T_{\text{abs,st}}$), maximale Temperaturerhöhung (TR_{max}) sowie Temperaturerhöhungsrate (TRR_{max}) in der Absorber- und hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) bzw. auf der Wandaußenseite (WK1).

	φ in °	$T_{\text{abs,st}}$ in °C	TR_{max} in K	TRR_{max} in $\frac{\text{K}}{\text{h}}$
WK1	0	4,0 ²²	12,8	-
WK2	19	13,8	2,2	0,8
WK4	19	13,0	17,5	5,1
WK4	24	13,4	13,8	4,6
WK4	30	13,5	9,9	3,4
WK4	50	13,2	5,8	2,0

Abbildung 5.6a zeigt den gemessenen Temperaturanstieg (TR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) und den Anstieg der Temperatur auf der Außenoberfläche (WK1) während des achtstündigen Bestrahlungsvorgangs sowie den Abklingvorgang bis hin zum erneuten Erreichen des stationären Ausgangszustands. Wie in der Abbildung erkennbar, zeigt WK1 einen sprunghaften Temperaturanstieg auf der Außenoberfläche, der zu einem Wärmetransport ins Vollziegelmauerwerk führt. An der Außenoberfläche steht somit der absorbierte solare Wärmestrom mit dem an die Luft konvektiv abgegebenen Wärmestrom und dem ins Mauerwerk geleiteten Wärmestrom im Gleichgewicht. Die Temperaturerhöhung auf der Außenoberfläche von WK1 beträgt nach acht Stunden 12,8 K. Nach der Beendigung des Bestrahlungsvorgangs fällt die Temperatur auf der Außenoberfläche abrupt ab, sodass, aufgrund des nun entstehenden großen Temperaturgradienten vom Ziegelmauerwerk zur Außenwand bzw. -luft und dem Nichtvorhandensein einer Dämmschicht, die eingespeicherte Wärme nur bedingt zur Innenseite geleitet werden kann.

Bei der herkömmlich gedämmten Wandkonstruktion WK2 ergibt sich, wie in Abbildung 5.6a dargestellt, eine maximale Temperaturerhöhung hinter der Dämmschicht von 2,2 K

²²Stationäre Oberflächentemperatur auf der Wandaußenseite ($T_{\text{OS,st}}$).



(a) Temperaturerhöhung (TR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) sowie auf der Außenwandoberfläche (WK1) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) bis zum Erreichen des stationären Ausgangszustands. (b) Temperaturerhöhung (TR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) innerhalb der ersten Stunde nach Bestrahlungsbeginn.

Abbildung 5.6: Temperaturerhöhung (TR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) sowie auf der Außenwandoberfläche (WK1) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

für den Einstrahlwinkel von 19° . Bei diesem Wandaufbau wird zwar nahezu²³ die gleiche Strahlungsenergie absorbiert, allerdings erfolgt aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit ein deutlich reduzierter Wärmetransport zum Vollziegelmauerwerk, weshalb auch der Temperaturanstieg geringer ausfällt. Die absorbierte Strahlungsleistung führt somit vor allem zum Anstieg der Oberflächentemperatur auf der Wandaußenseite, wobei im Anschluss die Wärme konvektiv zur Luft im Außenbereich abgegeben wird. Im Gegensatz zu WK1 fällt die Temperatur hinter der Dämmschicht nach dem Bestrahlungsende flacher ab (vgl. Abbildung 5.6a), da die, wenn auch nur geringfügig, eingespeicherte Energie länger im Vollziegelmauerwerk verbleibt. Allerdings wurde bei WK2 im Vergleich zu WK1 über den Versuchszeitraum von acht Stunden wesentlich weniger Energie eingespeichert.

Für das entwickelte solarselektive Wärmedämmsystem ergeben sich, wie in Abbildung 5.6a erkennbar, winkelabhängige Temperaturverläufe in der Absorberschicht. Diese Winkelabhängigkeit des Temperaturanstiegs soll das Überhitzungsrisiko in Sommermonaten bei hohen Sonnenständen reduzieren. Die größte Temperaturerhöhung von 17,5 K wird beim Auslegungspunkt von 19° für Wintermonate, d. h. paralleler Einstrahlung zur Bohrungsachse der lichtleitenden Elemente, erreicht. Mit zunehmenden Einstrahlwinkeln von 24° , 30° und 50° reduzieren sich die maximalen Temperaturerhöhungen auf 13,8 K, 9,9 K und 5,8 K. Vergleicht

²³Die kurzwelligen Absorptionsgrade von WK1 und WK2 sind aufgrund der gleichen Außenwandfarbe identisch, allerdings ergibt sich ein durch den Anstellwinkel ($\cos(19) = 0,9455$) geringfügig verminderter absorbierter solarer Wärmestrom.

man die maximalen Temperaturerhöhungen von 2,2 K und 17,5 K für WK2 bzw. WK4 bei 19°, unterscheiden sich diese um den Faktor acht. Aus dieser Tatsache wird der signifikante Beitrag der lichtleitenden Elemente zur Erhöhung der Temperatur hinter der Dämmschicht deutlich. Die gemessene Temperaturerhöhung von 5,8 K für den Einstrahlwinkel von 50°, der repräsentativ für den Sonnenstand in Sommermonaten steht, beträgt 33,1 % der maximalen Temperaturerhöhung von WK4 bei 19° (Winterfall). Dabei zeigt sich das Potential zur Verhinderung von sommerlicher Überhitzung des entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystems gegenüber bestehenden Lösungen für transparente Wärmedämmsysteme (vgl. Abbildung 2.8), welche über einen weiten Winkelbereich einen gleichbleibend hohen Transmissionsgrad aufweisen. Diese selektiven Eigenschaften wurden bereits in den stationären Untersuchungen zur Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrads des solarselektiven Wärmedämmsystems in Abschnitt 5.3.1 gezeigt. Die maximale Temperaturerhöhung von WK4 bei 50° (5,8 K) ist höher als die von WK2 bei 19° (2,2 K). Dies ist darauf zurückzuführen, dass trotz des hohen Einfallswinkels von 50° die Solarstrahlung in die lichtleitenden Elemente eintritt und dort vom Wärmedämmputz absorbiert wird. Im Gegensatz zu der vergleichsweise gut reflektierenden Außenfarbe, die einen integral gemittelten Absorptionsgrad von 19,6 % aufweist (vgl. Abbildung 3.5), beträgt der gemittelte Absorptionsgrad des Wärmedämmputzes 50,7 % (vgl. Abbildung 3.9). Demzufolge wird im vorderen Bereich der lichtleitenden Elemente eine beträchtliche Menge an Solarstrahlung absorbiert, die zur Absorberschicht geleitet wird und eine Temperaturerhöhung verursacht. Tabelle 5.5 fasst für die untersuchten Wandkonstruktionen WK1, WK2 und WK4 die maximalen Temperaturerhöhungen in der Absorberschicht bzw. auf der Wandaußenseite ($TR_{\max}$) zusammen.

Abbildung 5.6b veranschaulicht den Temperaturanstieg in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) während der ersten Stunde des Bestrahlungsvorgangs. Die dargestellten Temperaturverläufe der Wandkonstruktion WK4 zeigen, dass durch die Reduktion des Einstrahlwinkels die Ansprech- bzw. Reaktionszeit auf die einfallende Solarstrahlung abnimmt. Dies ist insbesondere bei kleinen Winkeln von großer Bedeutung, da so die Solarenergie bei Sonnenschein in Wintermonaten schnell in die Absorberschicht eingespeichert werden kann. Die Zeitverzögerung bis zum Temperaturanstieg beträgt für WK4 bei 50° bzw. WK2 bei 19° 0,15 h bzw. 0,4 h. Die längere Verzögerung kann hauptsächlich auf die transienten Diffusionsprozesse der absorbierten Sonnenenergie im Wärmedämmputz zurückgeführt werden.

Abbildung 5.7 zeigt die Temperaturerhöhungsrate (TRR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2), die nach Gleichung (5.11) berechnet wurde, während des Bestrahlungsvorgangs. Die Temperaturverläufe aus Abbildung 5.6a wurden zunächst, zur Reduktion des Messrauschens, mit einem Savitzky-Golay Filter erster Ordnung geglättet, bevor sie numerisch differenziert wurden. Je höher die TRR, desto größer ist die zeitliche Änderung der inneren Energie in der Absorberschicht (vgl. Gleichung (5.12)). Das bedeutet,

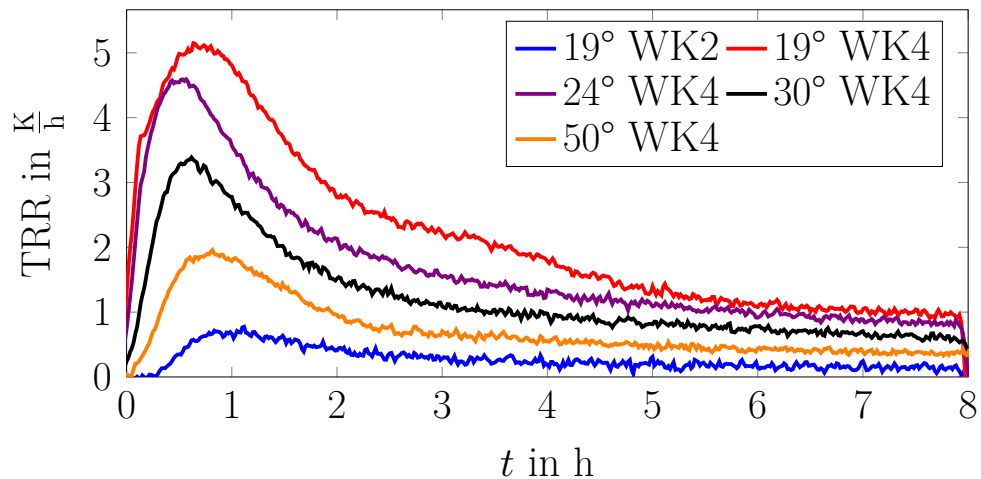


Abbildung 5.7: Temperaturerhöhungsrate (TRR) in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) während des Bestrahlungsvorgangs.

es liegt eine höhere Differenz zwischen dem ein- und austretenden Wärmestrom vor. Wie aus Abbildung 5.7 ersichtlich, ist die maximale TRR umso größer, je kleiner der Einfallswinkel ist. Dementsprechend kürzer ist die Zeit, die benötigt wird, um dieses Maximum zu erreichen. Für den Einfallswinkel von 19° wird das Maximum von $5,1 \frac{K}{h}$ allerdings etwas später als bei 24° erreicht (vgl. Abbildung 5.7). Dies ist auf die in der Absorber-Klebeschicht verbleibende Restfeuchte zurückzuführen, nachdem das solarselektive Wärmedämmsystem am Vollziegelmauerwerk appliziert wurde. Der Bestrahlungsversuch unter 19° war der erste in der durchgeführten Versuchsreihe, sodass hier noch signifikante Effekte dieser Feuchtigkeit vorhanden sind. Die TRR-Kurve beim Einfallswinkel von 19° zeigt einen starken Anstieg, bis sie nach $0,14$ h einen Wert von $3,7 \frac{K}{h}$ erreicht. Ab diesem Punkt beginnt die Verdunstung der Feuchtigkeit, was zu einer Abflachung der Kurve und einer Verschiebung des Maximums auf einen späteren Zeitpunkt, wie in Abbildung 5.7 veranschaulicht, führt. Die während der experimentellen Untersuchungen auftretenden maximalen Temperaturerhöhungsraten (TRR_{max}) sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Detaillierte Untersuchungen zum ein- und austretenden Wärmestrom der Absorberschicht sowie zur zeitlichen Änderung der inneren Energie, welche eine direkte Proportionalität zur hier vorgestellten TRR aufweist, werden in Kapitel 6 anhand des validierten numerischen Modells der SATIS Wandkonstruktion präsentiert [148].

5.3.3 Wandinnenseitiger solarer Gewinn und Wärmeverlustreduktionsfaktor

Neben den Kenngrößen zur Beurteilung der Energieeinspeicherung in die Absorberschicht sind auch die Leistungskenngrößen auf der Wandinnenseite, die zum einen den absoluten solaren Gewinn (SG nach Gleichung (5.13)) und zum anderen die relative zeitliche Energieeinsparung (HLRF nach Gleichung (5.14)) quantifizieren, von Bedeutung. Abbildung 5.8 zeigt für

die Wandkonstruktionen WK1, WK2 und WK4 bei den jeweiligen Einstrahlwinkeln den dimensionslosen Wärmestrom (DLHF), der nach Gleichung (5.15) bestimmt wird.

$$\text{DLHF} = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{\text{st}}} \quad (5.15)$$

Ausgehend vom stationären Wärmestrom ($\text{DLHF} = 1$) erfolgt eine von der Wandkonstruktion abhängige Reduktion des DLHF und ein darauffolgender Anstieg zum Ausgangswert. Der konkrete Funktionsverlauf, d. h. die maximale Reduktion des DLHF, der Zeitpunkt dieses Minimums nach Bestrahlungsbeginn sowie die zeitlichen Gradienten bei der Reduktion bzw. dem Wiederanstieg, ist abhängig von den Wärme- und Solarleitungseigenschaften der Wandkonstruktion.

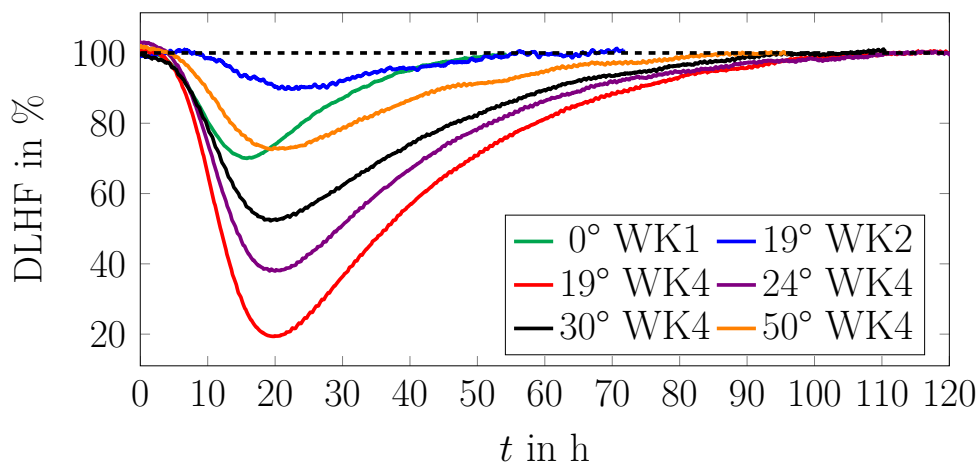


Abbildung 5.8: Dimensionsloser Wärmestrom auf der Wandinnenseite (DLHF) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ) für WK1, WK2 und WK4.

Die ungedämmte Wandkonstruktion WK1 erreicht das Minimum des DLHF, welches bei den vorliegenden Untersuchungen rund 70 % beträgt, rund 16,5 h nach Bestrahlungsbeginn. Dies ist auf das Nichtvorhandensein der Dämmschicht zurückzuführen, da im Vergleich zu WK2 und WK4, bei denen das Minimum zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird, die im Ziegelmauerwerk eingespeicherte Solarenergie ohne thermischen Widerstand durch ein entsprechendes Dämmmaterial unmittelbar an die Luft in der Außenkammer abgegeben wird. Betrachtet man den DLHF von WK2 für 19°, tritt das Minimum gegenüber WK1 zwar ca. 5 h später auf (21,6 h), allerdings ergibt sich nur ein minimaler DLHF von rund 90 %. Aufgrund der geringeren eingespeicherten Solarenergie (vgl. TR_{max} aus Tabelle 5.5), kann dem Wärmefluss von der Wandinnen- zur Wandaußenseite nur bedingt entgegengewirkt werden.

Ähnlich der Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) zeigt auch der DLHF von WK4 ein winkelabhängiges Verhalten. Je geringer der Einstrahlwinkel, desto größer ist TR und desto mehr Energie kann durch den thermischen Widerstand des solarselektiven

Wärmedämmsystems im Vollziegelmauerwerk verbleiben, um zur Reduktion des DLHF beizutragen. Hierbei ergibt sich für WK4, unter einem Einstrahlwinkel von 19° , eine Reduktion auf ein Minimum von rund 20 % nach 19,8 h. Gegenüber WK2 erfolgt auch ein deutlich schnellerer Wärmetransport der Solarenergie zur Wandinnenseite, was mittels der erstmaligen Abweichung des Funktionsverlaufs vom stationären Wärmestrom ($DLHF = 1$) quantifizierbar ist. Der Zeitverzug beträgt für WK2 bzw. WK4 unter dem Einstrahlwinkel von 19° 8,3 h bzw. 2,8 h, d. h. WK4 benötigt nur rund ein Drittel der Zeit bis eine messbare Reaktion auf der Wandinnenseite erfolgt.

Tabelle 5.6 listet für die untersuchten Wandkonstruktionen die beiden Leistungskenngrößen „Solarer Gewinn“ (SG) und „Wärmeverlustreduktionsfaktor“ (HLRF) entsprechend den Gleichungen (5.13) und (5.14) auf. Zudem ist die Zeit nach Bestrahlungsbeginn bis zum erneuten Erreichen des Beharrungszustands (t_{II}) aufgeführt. Der solare Gewinn, der den Transmissionswärmeverlust auf der Wandinnenseite reduziert, beträgt für WK2 nur $25,4 \frac{Wh}{m^2}$. Hierdurch konnte über 55,5 h eine Reduktion des Wärmeverlusts auf der Wandinnenseite von 4,4 % (HLRF) gegenüber dem stationären Zustand erzielt werden. Für WK1 ist die Zeit bis zum Erreichen des Ausgangszustands nahezu dieselbe wie bei WK2 (55,0 h), allerdings konnte ein höherer solarer Gewinn von $163,0 \frac{Wh}{m^2}$ erzielt werden, wodurch sich ein HLRF von 11,7 % ergibt. Vergleicht man WK2 und WK4 unter einem Einstrahlwinkel von 19° , dann ist der solare Gewinn der solarselektiven Wandkonstruktion ($394,5 \frac{Wh}{m^2}$) rund 15,5-mal höher. Darüber hinaus ist auch die Zeit bis zum erneuten Erreichen des stationären Zustands mehr als doppelt so lang (114,8 h). Aus dieser Tatsache ergibt sich, dass über diesen Zeitraum der Transmissionswärmeverlust um mehr als ein Viertel ($HLRF = 25,9\%$) reduziert werden konnte. Mit zunehmendem Einstrahlwinkel von WK4 reduzieren sich die Zeit bis zum erneuten Erreichen des Beharrungszustands, der solare Gewinn und der Wärmeverlustreduktionsfaktor entsprechend Tabelle 5.6. Für 50° beträgt der solare Gewinn ($122,5 \frac{Wh}{m^2}$) nur noch 31,1 % des solaren Gewinns bei 19° . Dieser reduzierte SG für hohe Einstrahlwinkel zeigt den Effekt der konstruktionsbedingten Verschattung der Absorberschicht durch das solarselektive Wärmedämmsystem, wodurch sommerlichen Überhitzungseffekten entgegengewirkt wird.

Tabelle 5.6 zeigt zudem den stationären Wärmeverlust der verschiedenen Wandkonstruktionen. Durch die Anbringung der MHGK-Dämmschicht konnte der stationäre Wärmeverlust von WK1 ($25,8 \frac{W}{m^2}$) um 60 % auf $10,3 \frac{W}{m^2}$ (WK2) gesenkt werden, allerdings fallen SG und HLRF, wie bereits erwähnt, deutlich geringer aus. Der höhere Wärmeverlust von WK4 ($(13,1 \pm 0,3) \frac{W}{m^2}$) gegenüber WK2 ($10,3 \frac{W}{m^2}$) ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Unter anderem sind der langwellige Strahlungstransport innerhalb des Hohlraums der lichtleitenden Elemente und die Verwendung von sehr gut wärmeleitenden Glaszylindern als Verschlusselemente hierfür verantwortlich [156]. Dies führt, wie in Abschnitt 5.3.1 gezeigt, zu einer höheren effektiven Wärmeleitfähigkeit des solarselektiven Wärmedämmsystems ($57 \frac{mW}{mK}$) gegenüber dem reinen MHGK-Wärmedämmputz ($45 \frac{mW}{mK}$). Weiterhin spielt auch die durch

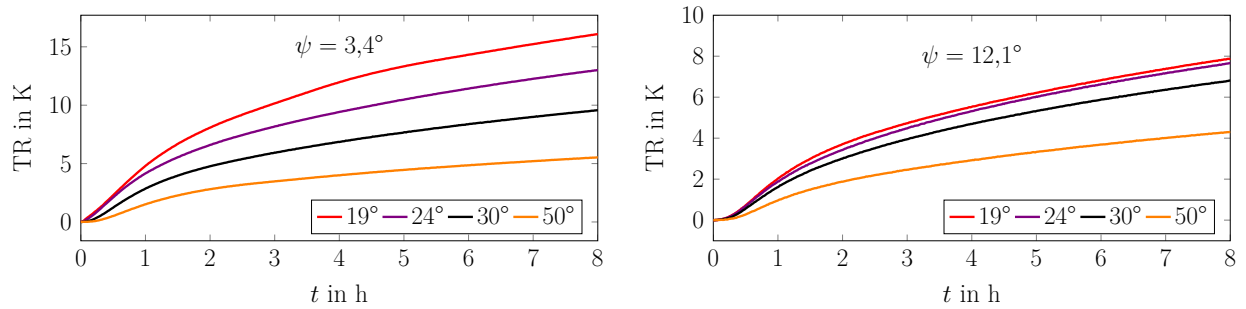
Tabelle 5.6: Untersuchte Einstrahlwinkel (φ), Zeit bis erneuten Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), solarer Gewinn (SG), Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) und stationärer Wärmeverlust ($\dot{q}_{st}$) für WK1, WK2 und WK4.

	φ in °	t_{II} in h	SG in $\frac{W}{m^2}$	HLRF in %	$\dot{q}_{st}$ in $\frac{W}{m^2}$
WK1	0	55,0	163,0	11,7	25,8
WK2	19	55,5	25,4	4,4	10,3
WK4	19	114,8	394,5	25,9	13,3
WK4	24	111,2	282,9	20,1	12,7
WK4	30	95,5	225,9	18,2	13,0
WK4	50	89,4	122,5	10,6	13,2

die Absorberschicht eingebrachte Feuchtigkeit eine Rolle, die vom hygroskopischen MHGK-Dämmputz aufgenommen wird und dessen Dämmwirkung vermindert. Dieser Effekt der Feuchtigkeit zeigt sich nicht nur im TRR bei 19° (vgl. Abbildung 5.7), sondern auch in der Änderung der stationären Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite während der Experimente. Entsprechend der Versuchsreihenfolge von 19°, 50°, 30° und 24° konnten Trocknungseffekte, d. h. eine Reduktion des Wärmestroms um rund 4,5 % (von 13,3 $\frac{W}{m^2}$ auf 12,7 $\frac{W}{m^2}$), messtechnisch erfasst werden. In Kapitel 6 wird ein numerisches Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems entwickelt und validiert, welches in Kapitel 7 zur thermischen (λ_{eff}) und solarstrahlungstechnischen (g) Verbesserung von SATIS verwendet wird.

5.3.4 Einfluss des Azimut auf die dynamische Temperaturerhöhung

Das entwickelte dynamische Testverfahren für die Prüfstandsuntersuchungen aus Abschnitt 5.2.2 wurde auch bei den Wandkonstruktionen WK4-3.4 und WK4-12.1 (vgl. Abschnitt 3.3.5) zur Untersuchung der Solarstrahlungsleitung angewandt [148]. Die Abbildungen 5.9a und 5.9b zeigen die gemessenen Temperaturerhöhungen in der Absorberschicht (TR) während des Bestrahlungszeitraums von 8 h für WK4-3.4 bzw. WK4-12.1 bei den Einstrahlwinkeln von 19°, 24°, 30° und 50°. Im Vergleich zur experimentellen Untersuchung der ursprünglichen Variante WK4 (vgl. Abbildung 5.6a), nimmt, bei gleichem Einstrahlwinkel φ und zunehmendem Azimut ψ , die maximale TR ab. Der größte Einfluss des Azimut ergibt sich entsprechend Tabelle 5.7 für den Auslegungswinkel des solarselektiven Wärmedämmsystems von 19°. Hier reduziert sich TR_{max} für $\psi = 12,1^\circ$ um 54,9 % gegenüber $\psi = 0^\circ$ (7,9 K vs. 17,5 K).



(a) Gemessene Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) während der Bestrahlung über 8 h für WK4-3.4 ($\psi = 3,4^\circ$). (b) Gemessene Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) während der Bestrahlung über 8 h für WK4-12.1 ($\psi = 12,1^\circ$).

Abbildung 5.9: Gemessene Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) für die zwei Varianten WK4-3.4 und WK4-12.1.

Tabelle 5.7: Einstrahlwinkel (φ) und maximale Temperaturerhöhung in der Absorberschicht ($TR_{\max}$) für die Wandkonstruktionen WK4, WK4-3.4 und WK4-12.1.

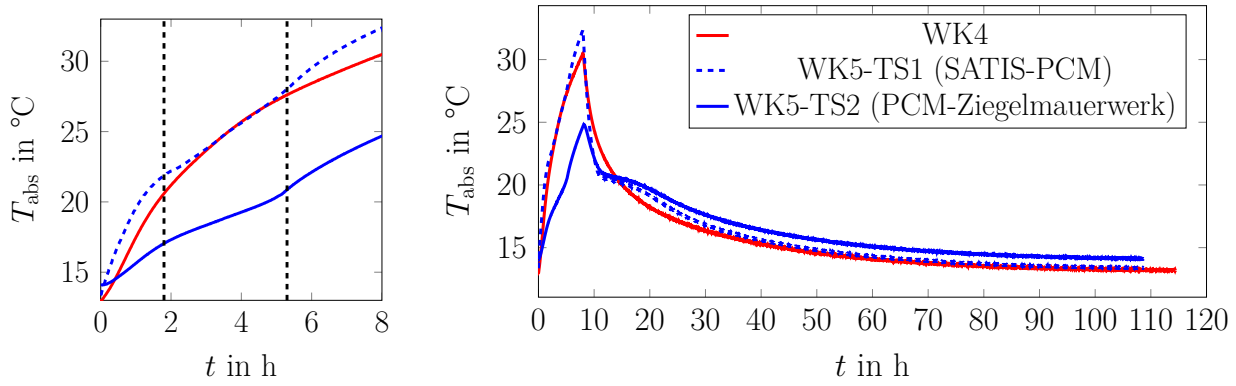
φ in $^\circ$	WK4 - $TR_{\max}$ in K	WK4-3.4 - $TR_{\max}$ in K	WK4-12.1 - $TR_{\max}$ in K
19	17,5	16,1	7,9
24	13,8	13,0	7,7
30	9,9	9,6	6,8
50	5,8	5,5	4,3

5.3.5 Einfluss der PCM-Schicht auf den dynamischen Wärmetransport

Die in Abschnitt 3.3.6 vorgestellte Wandkonstruktion WK5 beinhaltet, im Gegensatz zu WK4, eine zwischen dem solarselektiven Wärmedämmsystem und dem Ziegelmauerwerk liegende Schicht aus Phasenwechselmaterial. WK5 wurde ebenfalls mit dem entwickelten dynamischen Testverfahren untersucht. Hierbei soll der Einfluss der transienten Energieeinspeicherung und -freisetzung auf den solaren Gewinn und die Temperatur zwischen der Dämmschicht und dem Mauerwerk ermittelt werden.

Die Abbildungen 5.10a und 5.10b zeigen die Temperatur in der Absorberschicht (T_{abs}) der Wandkonstruktionen WK4 und WK5 bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19° während des achtstündigen Bestrahlungsvorgangs (Abbildung 5.10a) bzw. bis zum Erreichen des stationären Ausgangszustands (Abbildung 5.10b). Bei WK5 wurde auf beiden Seiten der PCM-Schicht je ein Temperatursensor platziert (TS1 in der Schicht SATIS-PCM bzw. TS2 in der Schicht PCM-Ziegelmauerwerk, vgl. Abbildung 3.12c).

Wie in Abbildung 5.10a zu erkennen ist, steigt die Temperatur TS1 in der Trennschicht SATIS-PCM zu Beginn stärker an als die Temperatur in WK4. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zum Vollziegelmauerwerk ($\lambda = 0,72 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$) die PCM-Schicht eine



- (a) Temperatur in der Absorberschicht (T_{abs}) für die solar-selektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19° während des Bestrahlungsvorgangs.
- (b) Temperatur in der Absorberschicht (T_{abs}) für die solar-selektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19° bis zum Erreichen des stationären Ausgangszustands.

Abbildung 5.10: Temperatur in der Absorberschicht (T_{abs}) für die solar-selektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19° .

deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$) aufweist, wodurch der Wärmetransport zur Wandinnenseite vermindert²⁴ wird. Folglich steigt die Temperatur TS2 in der Zwischenschicht PCM-Ziegelmauerwerk bedeutend langsamer an als die in WK4. Das Aufschmelzen der PCM-Schicht findet im Schmelztemperaturbereich von 19°C bis 23°C (typisch: 21°C , vgl. Abbildung 3.12b) statt. Die Zeitpunkte des Schmelzbegins bzw. des vollständig aufgeschmolzenen Zustands wurden mittels der Temperatursensoren TS1 bzw. TS2 bestimmt (Ab- bzw. Zunahme der zeitlichen Temperaturgradienten) und sind in Abbildung 5.10a als gestrichelte senkrechte Linien veranschaulicht. Der Schmelzvorgang findet im Zeitraum von 1,8 h bis 5,3 h nach Bestrahlungsbeginn statt. Zwischen den Spitzentemperaturen der Sensoren in WK4 und WK5 (TS2), die sich beide in der an das Vollziegelmauerwerk angrenzenden Klebeschicht befinden, liegt am Ende des Bestrahlungsvorgangs ein Unterschied von 5,8 K ($30,5^\circ\text{C}$ vs. $24,7^\circ\text{C}$) vor. Die Temperatur TS1 liegt zum selben Zeitpunkt bei $32,4^\circ\text{C}$.

Abbildung 5.10b zeigt die Temperaturverläufe von WK4 und WK5 bis zum Erreichen des stationären Ausgangszustands. Der Temperaturabfall von TS2 nach Bestrahlungsende erfolgt schneller als bei WK4, da aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der PCM-Schicht der Wärmetransport vom Vollziegelmauerwerk zur Wandaußenseite gehemmt wird. 11,3 h nach Bestrahlungsbeginn erfolgt der Phasenwechsel vom flüssigen in den festen Aggregatzu-

²⁴Die geringe Wärmeleitfähigkeit organischer PCMs und die nachteilige Wirkung auf die Energieein- und -speicherung wurde bereits in Abschnitt 2.3.4 thematisiert.

stand. Die in der PCM-Schicht gespeicherte Wärme wird bei zu diesem Zeitpunkt (11,3 h) gemessenen Sensortemperaturen von 20,6 °C (TS1) bzw. 21,0 °C (TS2) abgegeben. Hierdurch wird das weitere Absinken der Temperaturen TS1 bzw. TS2 und dementsprechend die Erhöhung der Temperaturdifferenz über das Ziegelmauerwerk vermindert, wodurch der nach außen gerichtete Wärmefluss gesenkt wird ($\dot{q} \sim \Delta T$). 14,8 h (TS1) bzw. 14,1 h (TS2) nach Bestrahlungsbeginn wird die Temperatur in der Absorberschicht von WK4 überschritten.

Abbildung 5.11 veranschaulicht für die Wandkonstruktion WK4 und WK5 die Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{IS}$) sowie deren zeitlichen Gradienten ($\frac{d}{dt}\dot{q}_{IS}$) vom Zeitpunkt des Bestrahlungsbeginns bis zum erneuten Erreichen des stationären Zustands. Auch hier wurde zunächst, zur Reduktion des Messrauschens, ein Savitzky-Golay Filter erster Ordnung zur Glättung eingesetzt, bevor der Differentialquotient berechnet wurde. Gegenüber WK4 ($t_{II} = 114,8$ h) wurde der Ausgangszustand bei WK5 bereits nach $t_{II} = 108,7$ h erreicht.

Wie aus Abbildung 5.11 hervorgeht, liegt im stationären Zustand bei WK5 eine um 11,5 % reduzierte Wärmestromdichte ($\dot{q}_{IS}$) gegenüber WK4 vor ($11,6 \frac{W}{m^2}$ vs. $13,1 \frac{W}{m^2}$). Dies lässt sich auf die Dämmwirkung der PCM-Schicht und die zusätzlich eingebrachte Klebeschicht zurückführen. Das Minimum der Kurve der Wärmestromdichte wird von 19,8 h (WK4) auf 25,2 h (WK5) verschoben und beträgt $3,9 \frac{W}{m^2}$. Dies entspricht einer Reduktion auf 33,6 % des stationären Werts (WK4: $2,6 \frac{W}{m^2}$ bzw. 20 %). Die PCM-Schicht führt somit zu einer Dämpfung und zeitlichen Verschiebung des Minimums (vgl. Abbildung 2.13), da nur ein geringerer Anteil der solaren Wärme zur Wandinnenseite transportiert wird.

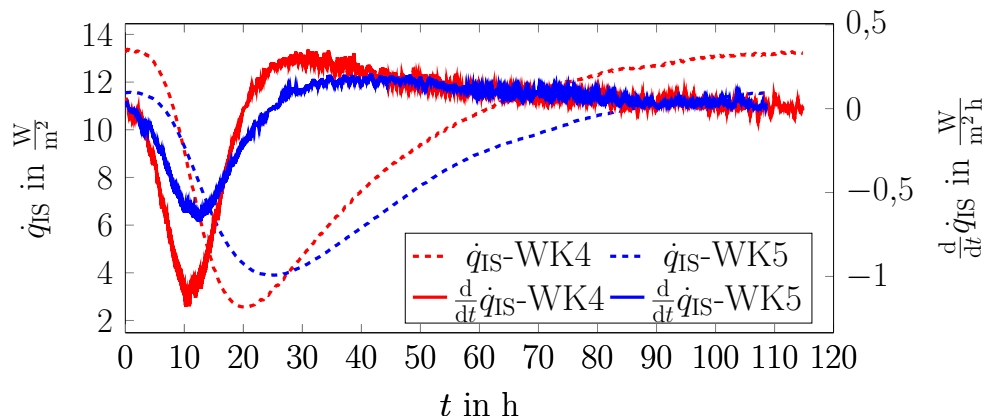


Abbildung 5.11: Wärmestromdichte ($\dot{q}_{IS}$) auf der Wandinnenseite sowie deren zeitliche Änderung ($\frac{d}{dt}\dot{q}_{IS}$) für die solar selektiven Wandkonstruktionen WK4 (ohne PCM-Schicht) und WK5 (mit PCM-Schicht) bei einem Einstrahlwinkel (φ) von 19°.

Die Einspeicherung bzw. Freisetzung der Wärme führt innerhalb der ersten 46,4 h nach Bestrahlungsbeginn zu einer betragsmäßigen Reduktion des in Abbildung 5.11 dargestellten Wärmestromdichte-Gradienten auf der Wandinnenseite ($\frac{d}{dt}\dot{q}_{IS}$). Dadurch erfolgt der Wiederanstieg von $\dot{q}_{IS}$ nach Erreichen des Minimums gegenüber WK4 langsamer. Im Vergleich

zu WK4 ($394,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, vgl. Tabelle 5.6) beträgt SG von WK5 nur $322,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, was einer Reduktion um 18,3 % entspricht. Betrachtet man den HLRF von WK4 (25,9 %) bzw. WK5 (25,7 %), zeigt sich, dass die relative zeitliche Energieeinsparung bis zum erneuten Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) für beide Wandkonstruktionen nahezu gleich ist. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Einbringung der PCM-Schicht unter Beibehaltung der relativen Energieeinsparung (HLRF) zu einer Erhöhung der thermischen Trägheit bei der Energieein- und -ausspeicherung führt.

5.4 Zusammenfassung

Die Ermittlung des solaren Gewinns von transparenten Wärmedämmsystemen bzw. Wandkonstruktionen wurde in diesem Kapitel anhand des winkelabhängigen Gesamtenergiedurchlassgrads als stationäre Größe sowie durch das eigens für den Differenzklimakammerprüfstand entwickelte dynamische Verfahren vorgestellt. Für das dynamische Verfahren wurden zur quantitativen Beurteilung der Messergebnisse eigens entwickelte Leistungskenngrößen verwendet, die ausschließlich einen Vergleich zwischen verschiedenen Wandkonstruktionen unter den für das Verfahren definierten Umweltrandbedingungen ermöglichen. Hierzu wurden zunächst die Wandkonstruktionen WK1 (ungedämmt) und WK2 (herkömmlich gedämmt) bei einem Einstrahlwinkel von 0° bzw. 19° untersucht. Anschließend wurde das solarselektive Wärmedämmsystem, einerseits ohne Wandkonstruktion und andererseits appliziert auf einem Vollziegelmauerwerk ohne (WK4) und mit PCM-Schicht (WK5), bei verschiedenen Winkeln, zur Beurteilung typischer Winter- und Sommereinstrahlbedingungen, experimentell untersucht.

Zunächst wurde die für das stationäre Verfahren benötigte effektive Wärmeleitfähigkeit des Prototyps des solarselektiven Wärmedämmsystems mit einem für den Prüfstand entwickelten Verfahren zu $(57 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{m}^2\text{K}}$ bestimmt. Der U -Wert des entwickelten prototypischen Systems beträgt somit $(0,64 \pm 0,02) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Zur weiteren Reduzierung dieser Größe und zur Erreichung des in Abschnitt 2.4 gesetzten Ziels ($0,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$) wird in Kapitel 6 ein numerisches Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems entwickelt, mithilfe dessen in Kapitel 7 der Einfluss der konstruktiven Merkmale auf die effektive Wärmeleitfähigkeit, und daraus abgeleitet den U -Wert, bestimmt wird. Der Gesamtenergiedurchlassgrad des Prototyps zeigt das gewünschte winkelsensitive Verhalten um den Auslegungswinkel (19°) und hat somit, gegenüber anderen transparenten Wärmedämmsystemen, das Potential, winterliche solare Gewinne zu erzielen, ohne auf eine zusätzliche Verschattungseinrichtung zum sommerlichen Überhitzungsschutz zurückgreifen zu müssen. Im Bestpunkt bei 19° beträgt g_{exp} 11,2 % und reduziert sich bei einem Einstrahlwinkel von 60° um 75 % auf nur noch 2,9 %. Zur Erreichung des in Abschnitt 2.4 festgelegten Ziels (Bestpunkt: 20 %) wird auch für diese Größe in Kapitel 7 eine Parameterstudie hinsichtlich der konstruktiven Merkmale durchgeführt.

Die gemessene Temperatur in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (WK4 bzw. WK2) und, für Vergleichszwecke, die gemessene Oberflächentemperatur auf der Wandaußenseite von WK1 wurden zur Bestimmung der Temperaturerhöhung (TR) und der Temperaturerhöhungsrate (TRR) verwendet. Für WK1 ($TR = 12,8\text{ K}$) konnte eine gegenüber WK2 ($TR = 2,2\text{ K}$) deutlich größere Temperaturerhöhung und demzufolge eine höhere Energieeinspeicherung in das Vollziegelmauerwerk erzielt werden. Allerdings konnte, aufgrund der fehlenden Dämmschicht, der Wärmetransport zur Wandinnenseite nur eingeschränkt aufrechterhalten werden, da die aufgenommene und eingespeicherte Energie umgehend an die Luft in der Außenkammer abgegeben wurde. Für WK2 konnte, aufgrund der Dämmschicht, nur eine geringe Menge an Energie einspeichert werden ($TR = 2,2\text{ K}$), wodurch der Transmissionswärmeverlust auf der Wandinnenseite nur in geringem Maße reduziert werden konnte. Das solar selektive Wärmedämmsystem (WK4) erzielte im Auslegungspunkt von 19° eine maximale Temperaturerhöhung von $17,5\text{ K}$ und eine maximale Temperaturerhöhungsrate von $5,1 \frac{\text{K}}{\text{h}}$. Beide Leistungskenngrößen zeigen eine starke Winkelabhängigkeit, d. h. mit zunehmendem Einfallswinkel erfolgt eine Abnahme der eingespeicherten Energie sowie des Wärmestroms ins Massivmauerwerk. Für 50° betragen die maximale TR und TRR nur noch $5,8\text{ K}$ bzw. $2 \frac{\text{K}}{\text{h}}$.

Eine Energieeinspeicherung in das Massivmauerwerk und die darauffolgende Wärmeleitung zur Wandinnenseite resultiert in einer mehr oder weniger ausgeprägten Reduktion der wandinnenseitigen Wärmestromdichte. Die Leistungsindikatoren „Solarer Gewinn“ (SG) und „Wärmeverlustreduktionsfaktor“ (HLRF) quantifizieren den absoluten solaren Energiegewinn bzw. die relative zeitliche Energieeinsparung und betragen für WK2 bei 19° nur $25,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ und $4,4\%$. Dieser geringe Einfluss der Solarstrahlung auf die Wärmeverluste auf der Wandinnenseite korreliert mit der geringen Temperaturerhöhung in der Absorberschicht und ist auf die Dämmschicht von WK2 zurückzuführen. Der Einfluss der lichtleitenden Elemente in der solar selektiven Wandkonstruktion WK4 zeigt sich im Auslegungspunkt (19°) in einem deutlich höheren solaren Gewinn ($394,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$) und Wärmeverlustreduktionsfaktor ($25,9\%$). Mit zunehmendem Einstrahlwinkel nehmen der SG und der HLRF ab, sodass beide Größen für 50° nur noch $122,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ bzw. $10,6\%$ betragen und somit auch in den dynamischen Untersuchungen das winkelsensitive Verhalten des solar selektiven Wärmedämmsystems bestätigen.

Zur Untersuchung des Einflusses des Azimut (ψ) auf die Temperaturerhöhung in der Absorberschicht der solar selektiven Wandkonstruktion erfolgte eine geometrische Modifizierung von WK4 ($\psi = 0^\circ$) zu WK4-3.4 ($\psi = 3,4^\circ$) und WK4-12.1 ($\psi = 12,1^\circ$). Hierbei zeigte sich, dass bei gleichbleibendem Einstrahlwinkel φ und zunehmendem Azimut ψ die maximale Temperaturerhöhung abnimmt.

Die dynamische Latentwärmespeicherung und die Einflüsse der PCM-Schicht auf die Absorbertemperatur und die Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite wurden mittels

der Wandkonstruktion WK5 untersucht. Die Freisetzung der Wärme der PCM-Schicht setzt 11,3 h nach Bestrahlungsbeginn ein. Nach 14,8 h (TS1) bzw. 14,1 h (TS2) führt die Wärmefreisetzung auf beiden Seiten der PCM-Schicht zu höheren Temperaturen als in der Absorberschicht von WK4. Weiterhin zeigt sich, dass der absolute solare Gewinn auf der Wandinnenseite (SG) von WK5 gegenüber dem von WK4 bei einem Einstrahlwinkel von 19° zwar um 18,3 % ($322,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ vs. $394,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$) geringer ist, allerdings konnte bei nahezu gleichbleibender zeitlicher Energieeinsparung (HLRF WK4: 25,9 %, HLRF WK5: 25,7 %) die thermische Trägheit erhöht werden.

6 Modellbildung, Simulation und Validierung virtueller Wandkonstruktionen

In diesem Kapitel werden sukzessiv entwickelte stationäre und dynamische Simulationsmodelle für die untersuchten Wandkonstruktionen sowie die mathematische Modellierung der jeweils dahinterliegenden physikalischen Vorgänge vorgestellt. Ein anschließender Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Ergebnisse mittels verschiedener Kenngrößen wird zur Validierung der virtuellen Modelle eingesetzt.

6.1 Zielsetzung

Die klassische experimentelle Untersuchung von Wandkonstruktionen im Prüfstand ermöglicht die Bestimmung von Kenngrößen (z. B. effektive Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitwert oder solarer Gewinn), die die stationären und dynamischen Eigenschaften der jeweiligen Wandaufbauten unter definierten Randbedingungen beschreiben. Hierzu wird mit Sensoren an meist wenigen Messstellen, welche oftmals an der Wandinnen- und -außenseite bzw. an Schichtgrenzen platziert sind, das Verhalten der Wandkonstruktion auf Änderungen der Umweltbedingungen (z. B. Lufttemperaturänderung, Solarstrahlungseinfall) messtechnisch erfasst. Langzeitstudien über das Verhalten des Wandaufbaus werden bei experimentellen Untersuchungen in der Regel an realen Objekten durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Wandkonstruktion mit einem den gleichen Bedingungen ausgesetzten Referenzsystem zu vergleichen. Neben einem großen messtechnischen Aufwand umfassen derartige Untersuchungen lange Zeiträume, da zumeist das ganzjährige Verhalten der Wandkonstruktion von Interesse ist.

Sollen gezielt Optimierungen eines komplexen, neuartigen Systems oder beschleunigte Untersuchungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, kann ein virtuelles Modell des realen Objekts ein geeignetes Mittel sein, wenn hierdurch die wesentlichen physikalischen Vorgänge innerhalb des Wandaufbaus realitätsnah abgebildet werden können. Daher soll im Folgenden eine aufeinander aufbauende Validierung mit zunehmender mathematischer Komplexität des Systems erfolgen. Ausgehend vom Modell der ungedämmten Wandkonstruktion (WK1) wird dabei eine sukzessive Erweiterung, zunächst mit einer Dämmschicht (WK2) und anschließend mit lichtleitenden Elementen (WK4), vorgenommen. Hierzu werden detailliert die geometrische und mathematische Modellierung der entwickelten Modelle erörtert.

6.2 Methodik

Zu Beginn wird die numerische Modellierung der Wandkonstruktionen WK1, WK2 und WK4 in verschiedenen Detaillierungsebenen - abhängig von der Komplexität des Wandaufbaus - vorgestellt. Hierzu wird die Multiphysik-Simulationssoftware COMSOL Multiphysics® verwendet. Anschließend werden die für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation genutzten Kenngrößen eingeführt und definiert.

6.2.1 Numerische Modellierung

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Entwicklung eines mathematischen Modells ausgehend von der ungedämmten (WK1) über die herkömmlich gedämmte Wandkonstruktion (WK2) bis hin zum solarselektiven Wärmedämmsystem (WK4).

6.2.1.1 Dynamisches 1D- und 3D-Modell der ungedämmten (WK1) sowie 3D-Modell der herkömmlich gedämmten (WK2) Wandkonstruktion

Zur numerischen Untersuchung des dynamischen Wärmetransports innerhalb der mehrschichtigen Wandkonstruktionen wird die dreidimensionale Wärmeleitungsdifferentialgleichung benötigt. Hierzu wird die stationäre Gleichung (4.5) um einen transienten Energiespeicherterm erweitert, sodass sich Gleichung (6.1) ergibt.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (6.1)$$

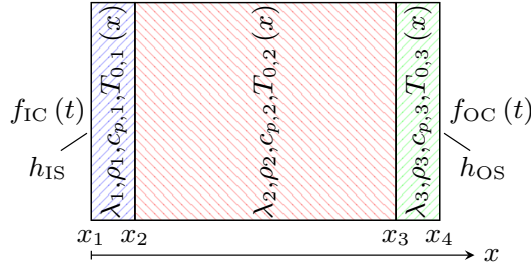
Hierin bezeichnet ρ die Dichte und c_p die spezifische Wärmekapazität des jeweiligen Materials. Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erläutert, sind die wandinnen- und wandaußenseitigen Wärmestromdichten von WK1 nahezu identisch (1D-Wärmeffluss). Für die Modellierung des eindimensionalen Wärmetransports können in Gleichung (6.1) Temperaturgradienten in zwei der drei (y und z) Richtungen unberücksichtigt bleiben, sodass sich die vereinfachte Gebietsbedingung nach Gleichung (6.2) ergibt.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6.2)$$

Abbildung 6.1 zeigt schematisch die für die Modellierung relevanten physikalischen Größen der Wandkonstruktion WK1, Tabelle 6.1 die zugehörigen Materialeigenschaften. An den Schichtgrenzen zwischen den Materialien (x_2 und x_3 , allgemein IFL) herrscht die Kontinuitätsbedingung für die Temperatur und den Wärmestrom entsprechend den Gleichungen (6.3) und (6.4).

$$\lim_{x \rightarrow \text{IFL}^-} T(t, x) = \lim_{x \rightarrow \text{IFL}^+} T(t, x) \quad (6.3)$$

$$\lim_{x \rightarrow \text{IFL}^-} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow \text{IFL}^+} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6.4)$$



1: Innenputz, 2: Vollziegelmauerwerk, 3: Außenputz

Tabelle 6.1: Thermophysikalische Materialeigenschaften für das eindimensionale dynamische Modell der Wandkonstruktion WK1.

Nr.	λ in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
1	0,7 [133]	1365	1000 [158]
2	0,72	1800	850
3	0,85 [134]	1300 [134]	1100 [159]

Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der relevanten physikalischen Einflussgrößen zur dynamischen Modellierung des Wärmetransports innerhalb der Wandkonstruktion WK1.

Die Temperaturverteilung zu Beginn der transienten Simulation wird innerhalb der jeweiligen Schicht durch $T_{0,i}(x)$ mit $i = 1 \dots 3$ vorgegeben. In den vorliegenden Untersuchungen befindet sich die Wandkonstruktion WK1 vor der dynamischen Untersuchung im stationären Zustand, sodass der Temperaturverlauf in den jeweiligen Schichten linear ist. Die beiden benötigten Randbedingungen der partiellen Differentialgleichung auf der Wandinnen- (x_1) und Wandaußenseite (x_4) sind in den Gleichungen (6.5) und (6.6) allgemein definiert.

$$-\lambda_1/h_{\text{IS}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = f_{\text{IC}}(t) - T(t, x = x_1) \quad (6.5)$$

$$-\lambda_3/h_{\text{OS}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_4} = T(t, x = x_4) - f_{\text{OC}}(t) \quad (6.6)$$

Im konkreten Fall ergeben sich für WK1 die Umgebungsfunktionen zu $f_{\text{IC}}(t) = T_{\text{IC}}$ und $f_{\text{OC}}(t) = T_{\text{OC}} + I_{\text{S},\perp}(t) \cos(\varphi) \alpha / h_{\text{OS}}$. Auf der Wandaußenseite wird gegenüber der -innenseite, zusätzlich zum konvektiv-radiativen (langwelligen) Wärmeübergang, der über die aus Prüfstandsuntersuchungen ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten h_{OS} bzw. h_{IS} berücksichtigt wird, die kurzwellige absorbierte Strahlungsleistung des Solarsimulators ($I_{\text{S},\perp}(t) \cos(\varphi) \alpha$) modelliert.

Zusätzlich zum 1D-Modell der Wandkonstruktion WK1 soll eine dreidimensionale Betrachtung vorgenommen werden. Hierbei soll die Modellqualität durch die Miteinbeziehung des in der Realität auftretenden Wärmestroms durch die Seitenflächenisolierung verbessert werden, wenngleich auch nur geringe Unterschiede zwischen der innen- und außenseitigen Wandwärmestromdichte vorhanden sind. Hierzu wird der bereits in Abschnitt 4.2.2 exemplarisch für WK2

vorgestellte Ansatz der dreidimensionalen Viertel-Modellierung (vgl. Abbildungen 4.3a und 4.3b) angewandt. Im Gegensatz zu den in Kapitel 4 durchgeführten stationären Berechnungen muss, aufgrund der transienten Wärmespeichervorgänge, Gleichung (6.1) zur Ermittlung des zeitabhängigen dreidimensionalen Temperaturfelds gelöst werden. Zudem müssen die bisherigen Randbedingungen auf der Wandaußenseite (vgl. Tabelle 4.1) in Bezug auf die Absorption der Solarstrahlung angepasst werden. Abbildung 6.2 zeigt, in entsprechender farblicher Umrandung, die Randbedingungen auf der Wandaußenseite. Die mathematische Beschreibung und Zuordnung der Randbedingungen kann Tabelle 6.2 entnommen werden. Weiterhin werden die bei dynamischen Vorgängen relevanten Materialeigenschaften der Wandkonstruktion WK1 aus Tabelle 6.1 bzw. der Wandprobenhalterung aus Tabelle 6.2 für die Modellierung benötigt. Die stationäre Temperaturverteilung $T_0(x, y, z)$ wird zu Beginn des transienten Bestrahlungsvorgangs als Anfangsbedingung verwendet. Die beschriebene Vorgehensweise für die dreidimensionale dynamische Modellierung von WK1 ist auch für die herkömmlich gedämmte Wandkonstruktion WK2 gültig, wobei zusätzlich die Materialkenndaten des verwendeten MHGK-Dämmsystems ([54, 138]) in die Simulation einfließen.

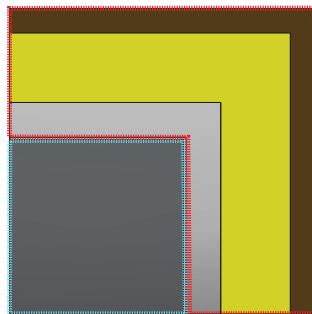


Abbildung 6.2: Randbedingungen auf der Wandaußenseite der Wandkonstruktion WK1 bei der dynamischen Simulation. Die farblich umrandeten Flächen sind der mathematischen Beschreibung in Tabelle 6.2 zugeordnet.

Tabelle 6.2: Materialkennwerte für die dynamische Modellierung der Wandprobenhalterung aus Abbildung 6.2. Zudem sind die farblich umrandeten Flächen den mathematischen Randbedingungen zugeordnet.

Material	λ in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
SDP	0,17 [130]	700 [160]	1900 [160]
XPS	0,034 [129]	40 [161]	1450 [161]
VIP	0,007 [128]	190 [162]	800 [162]
PMMA	0,19 [155]	1190 [155]	1500 [155]

Rot: $-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{OS}} (T_{\text{OC}} - T)$

Cyan: $-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{OS}} (T_{\text{OC}} - T) + I_{\text{S},\perp}(t) \cos(\varphi) \alpha$

6.2.1.2 Stationäres und transientes 3D-Modell der solarselektiven Wandkonstruktion (WK4)

Die in Abschnitt 3.3.5 vorgestellte solarselektive Wandkonstruktion WK4 unterscheidet sich hinsichtlich der Komplexität grundlegend von den herkömmlichen Wandaufbauten WK1 und WK2. Die Inhomogenität der Dämmschicht, d. h. die Kombination aus dem Grundmaterial (Wärmedämmputz) und den lichtleitenden Elementen (Glaszylinder und Luftkapillare), erfordert eine besonders feine Diskretisierung des Rechengebiets. Um den numerischen Berechnungsaufwand bei der Modellierung deutlich zu reduzieren, erfolgt die ausschließliche Betrachtung eines einzelnen lichtleitenden Elements mit umgebendem Wärmedämmputz. Dieses Modell steht repräsentativ für den Prototyp und weist an der Wandaußenseite (26,4 %) und -innenseite (14,9 %) denselben Flächenanteil der Bohrungen auf. Zunächst werden mittels eines stationären Modells, welches nur das solarselektive Wärmedämmsystem ohne Vollziegelmauerwerk beinhaltet, Untersuchungen zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}), zum relativen Einfluss der auftretenden Wärmetransportmechanismen auf λ_{eff} und zum Gesamtenergiedurchlassgrad (g) durchgeführt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit des solarselektiven Wärmedämmsystems wurde bereits mit dem entwickelten Verfahren aus Abschnitt 5.2.1 für die drei verschiedenen Kammerlufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1 in drei Herstellungsstadien im Prüfstand experimentell ermittelt und soll zur Modellvalidierung dienen.

Die stationäre numerische Untersuchung des solarselektiven Wärmedämmsystems wird für Stadium 2 (gebohrte Platte) und Stadium 3 (gebohrte Platte mit Glaszylinder) durchgeführt. Stadium 1, in dem nur Wärmeleitung vorliegt, wird nicht modelliert, da die effektive Wärmeleitfähigkeit in diesem Zustand der Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmputzes ($(45 \pm 2) \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ [156]) entspricht. Die Abbildungen 6.3a und 6.3b veranschaulichen die stationären Modelle des solarselektiven Wärmedämmsystems in den Stadien 2 und 3. Beide Modelle weisen eine quadratische Querschnittsfläche auf, um die sich auf der Absorberfläche überlagernden Einflüsse der LCEs in der Mitte (6 Nachbarn) und am Rand (2-3 Nachbarn) bestmöglich zu berücksichtigen. Tabelle 6.3 listet die Materialien, Materialeigenschaften und Randbedingungen dieser Modelle auf. Das Rechengebiet 5) wird lediglich als Einlassgebiet für den kurzwelligen Strahlungstransport mittels Ray Tracing benötigt und wird im weiteren Verlauf detailliert erörtert. Die vier Seitenflächen der Modelle sind mit adiabaten Randbedingungen ($-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0$) versehen, da auch in den Prüfstandsuntersuchungen ein nahezu eindimensionaler²⁵ Wärmestrom durch das solarselektive Wärmedämmsystem experimentell beobachtet werden konnte [156].

Die mathematische Modellierung der Wandkonstruktionen WK1 und WK2 beschränkt

²⁵Die mittlere Abweichung der Wärmestromdichten betrug im Mittel über alle Messung 2,6 % und ist geringer als die Messunsicherheit der Wärmestrommessplatten ($\pm 5 \%$).

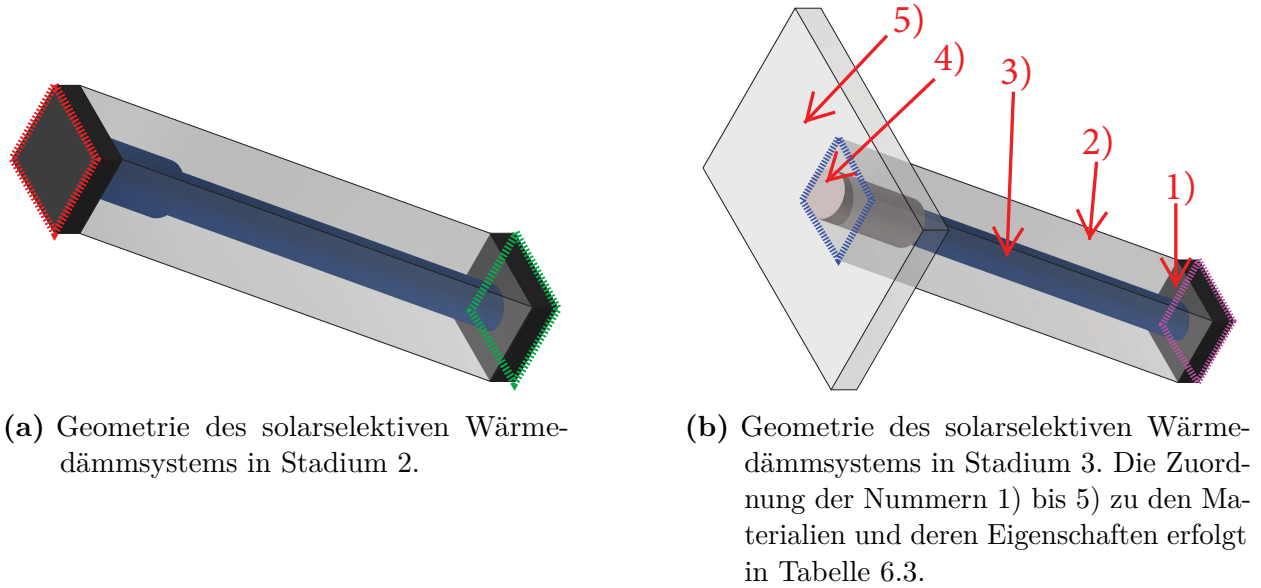


Abbildung 6.3: Geometrien der stationären Modelle des solarselektiven Wärmedämmsystems in den Stadien 2 und 3.

Tabelle 6.3: Materialien, Materialeigenschaften und thermische Randbedingungen für die Modelle des solarselektiven Wärmedämmsystems in den Stadien 2 und 3.

Nr.	Material	λ in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	n	Ref.
1)	Stahlblech	31	7870	435	-	[163]
2)	Wärmedämmputz	0,045	125	1150	-	[122, 54]
3) & 5)	Luft (COMSOL ref. Material)	$\lambda(T)$	$\rho(T)$	$c_p(T)$	1	[164]
4)	Borosilikatglas	1,2	2230	830	1,473	[145]
	Rahmenfarbe	Rot		Grün		
	Randbedingung	$T_{\text{OS}} = \text{const.}$		$T_{\text{IS}} = \text{const.}$		
	Rahmenfarbe	Blau		Violett		
	Randbedingung	$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{OC}} (T_{\text{OC}} - T_{\text{OS}})$		$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{g}: T_{\text{IS}} = \text{const.}$		
				$\underline{g}: -\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = h_{\text{IC}} (T_{\text{IC}} - T_{\text{IS}})$		

sich, hinsichtlich der Gebietsbedingung, auf die Festkörperwärmeleitung nach Gleichung (6.1). Das Vorhandensein der lichtleitenden Elemente in der solarselektiven Wärmedämmung führt dazu, dass grundsätzlich, neben der Festkörperwärmeleitung, folgende physikalische Phänomene vorhanden sind:

1. Wärmeleitung im Fluid, d. h. im luftgefüllten Bereich des lichtleitenden Elements.
2. Natürliche Konvektion in der Luftkapillare durch die über die Dämmschicht anliegende Temperaturdifferenz und den schrägen Anstellwinkel der Bohrungen zur Horizontalen.
3. Langwelliger Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen der Luftkapillare.
4. Kurzwelliger Solarstrahlungstransport im lichtleitenden Element, z. B. Strahlungsbrechung durch den Glaszylinder, gerichtete (Total-)reflexionen beim Übergang Glas-Luft und diffuse Reflexion an den Kapillarwänden.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Phänomene wird der stationäre Wärmetransport im solarselektiven Wärmedämmsystem mittels Gleichung (6.7) modelliert.

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = -\nabla \cdot (\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}_r) \quad (6.7)$$

ρ bezeichnet die Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität, $\mathbf{u}$ den Geschwindigkeitsvektor, ∇ den Nabla Operator, T die Temperatur, $\dot{\mathbf{q}}$ den Vektor der Wärmestromdichte durch Wärmeleitung und $\dot{\mathbf{q}}_r$ den Vektor der Wärmestromdichte durch langwelligen Strahlungsaustausch. Entsprechend dem Stefan-Boltzmann Gesetz wird die flächenspezifische Ausstrahlung ($e_b(T)$) eines Schwarzen Körpers über alle Wellenlängen durch Gleichung (6.8) bestimmt und hängt von der vierten Potenz der thermodynamischen Temperatur ab.

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (6.8)$$

σ bezeichnet die Stefan-Boltzmann Konstante ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) und n den Brechungsindex. Die nach innen gerichtete radiative Wärmestromdichte ($-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_r$) wird entsprechend Gleichung (6.9) aus der Differenz der absorbierten (αG) and emittierten ($\varepsilon e_b(T)$) Strahlungsleistung bestimmt, wobei für opake, grau diffus strahlende Oberflächen Gleichung (6.10) gültig ist.

$$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}}_r = \varepsilon (G - e_b(T)) \quad (6.9)$$

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho \quad (6.10)$$

Die mathematische Beschreibung der Fluidbewegung erfolgt mit den Gleichungen zur Massen- und Impulserhaltung entsprechend (6.11) und (6.12). p , μ , $\mathbf{I}$ und $\mathbf{f}$ bezeichnen den

Druck, die dynamische Viskosität, die Einheitsmatrix und den Vektor der Volumenkräfte. Die Oberflächen innerhalb des lichtleitenden Elements sind mit einer Haftbedingung versehen.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (6.11)$$

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{f} \quad (6.12)$$

Neben den stationären Untersuchungen, welche sich auf das eigentliche solarselektive Wärmedämmsystem beschränken, werden mittels dem in Abbildung 6.4 dargestellten transienten Modell der Wandkonstruktion WK4 dynamische Studien durchgeführt. Zur Modellvalidierung werden, wie bereits in Abschnitt 5.2.2 erwähnt, die experimentellen Ergebnisse des dynamischen Testverfahrens verwendet. In diesem Modell befindet sich das entwickelte solarselektive System auf einem innenseitig verputzten Vollziegelmauerwerk.



Abbildung 6.4: Transientes Modell der Wandkonstruktion WK4, bestehend aus dem solarselektiven Wärmedämmsystem und einem innenseitig verputzten Vollziegelmauerwerk. Die Zuordnung der Materialien entspricht der aus Abbildung 6.3b.

Das transiente Modell weist auf beiden Stirnseiten dieselben konvektiven Randbedingungen (farbige Umrandungen) wie das stationäre Modell auf (vgl. Tabelle 6.3). Als Anfangsbedingung für die dynamischen Untersuchungen wird, entsprechend Gleichung (6.13), eine lineare Temperaturverteilung innerhalb des Wandaufbaus angesetzt.

$$T(t = 0, z) = T_0(z) \quad (6.13)$$

z bezeichnet hier den Vektor senkrecht zur Außen- bzw. Innenoberfläche. Als Stützstellen für die lineare Temperaturverteilung in Gleichung (6.13) werden die gemessenen Temperaturen auf der Wandinnenseite und in der Absorberschicht sowie die berechnete stationäre Temperatur auf der Wandaußenseite verwendet. Wie bereits in der Beschreibung des stationären Modells erwähnt, besitzt auch dieses Modell einen zusätzlichen Luftbereich auf der Wandaußenseite, welcher mit 5) bezeichnet ist. Dieses Gebiet wird ausschließlich zur Berechnung des kurzwelligen Strahlungstransports benötigt. Im Gegensatz zur bisherigen Modellierung der Solarstrahlung, im Fall von WK1 und WK2 über den zusätzlichen Solarstrahlungsterm ($I_{S,\perp}(t) \cos(\varphi) \alpha$), erfolgt hier, ausgehend von Gebiet 5), das Aussenden einer Vielzahl an einzelnen Lichtstrahlen zur Simulation der Interaktion der Strahlen mit dem lichtleitenden

Element (Ray Tracing). Für die Validierung des transienten Modells, d. h. für den Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 5, muss, im Gegensatz zum stationären Modell, welches nur das solarselektive Wärmedämmsystem umfasst, zusätzlich der über die Seitenflächen fließende Randwärmestrom berücksichtigt werden (Randbedingung senkrecht zur Hauptwärmestromrichtung). Dieser Wärmeverlust wird aus den experimentellen Untersuchungen, in Kombination mit einem Simulationsmodell von WK4, über das in Kapitel 4 beschriebene Parameteridentifikationsverfahren abgeleitet.

Der kurzwellige Strahlungstransport erfolgt ausschließlich in den in den Abbildungen 6.3b bzw. 6.4 dargestellten Gebieten 3), 4) und 5). Die Strahlung, die auf die Festkörper-Ränder dieser Gebiete (z. B. Kapillärwände) trifft, wird dort absorbiert und mittels einer Wärmefluss-Randbedingung nach Gleichung (6.14) in die Berechnung des Temperaturfelds integriert.

$$-\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{q}} = \dot{q}_b \quad (6.14)$$

Der Randwärmestrom ($\dot{q}_b$) auf einem diskretisierten Flächenelement berechnet sich aus der absorbierten Strahlungsleistung aller Lichtstrahlen, die dieses Flächenelement treffen.

Der Strahlungstransport wird mittels eines Ray Tracing-Ansatzes modelliert, in dem das elektrische Feld $\mathbf{E}$ einer elektromagnetischen Welle in Form von Gleichung (6.15) beschrieben wird [165].

$$\mathbf{E} = \mathbf{a}e^{i\chi} \quad (6.15)$$

Hierbei bezeichnet $\mathbf{a}$ die Amplitude und χ die Phase, die wiederum vom Positionsvektor $\mathbf{r}$ und der Zeit t abhängig ist. Unter der Annahme, dass das Feld in einem hinreichend großen Abstand zur nächsten Quelle beobachtet wird, kann die Phase χ durch Gleichung (6.16) ausgedrückt werden.

$$\chi = \mathbf{v} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \gamma \quad (6.16)$$

In Gleichung (6.16) bezeichnet $\mathbf{v}$ den Wellenvektor, ω die Kreisfrequenz und γ eine beliebige Phasenverschiebung. Der Zusammenhang der Kreisfrequenz und des Wellenvektors in einem isotropen Medium ist durch Gleichung (6.17) gegeben.

$$\omega = \frac{c|\mathbf{v}|}{n(\mathbf{r})} \quad (6.17)$$

Darin bezeichnet c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und $n(\mathbf{r})$ den Brechungsindex des Mediums, welcher für Borosilikatglas und Luft in Tabelle 6.3 aufgeführt ist. Ferner kann abgeleitet werden, dass sowohl der Wellenvektor als auch die Kreisfrequenz durch die Phase entsprechend Gleichung (6.18) ausgedrückt werden können.

$$\mathbf{v} = \frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{r}} \quad \omega = -\frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (6.18)$$

Unter Verwendung der Analogie aus [166] ergibt sich, dass, für die Komponenten der Vektoren $\mathbf{v}$ und $\mathbf{r}$, die Strahlungstrajektorie mittels sechs gekoppelter Differentialgleichungen erster Ordnung nach Gleichung (6.19) berechnet werden kann.

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{r}} \qquad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{v}} \quad (6.19)$$

In Gebieten mit konstantem Brechungsindex n können die Zusammenhänge vereinfacht und mittels Gleichung (6.20) beschrieben werden.

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{0} \qquad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{c\mathbf{v}}{n|\mathbf{v}|} \quad (6.20)$$

Abbildung 6.5 veranschaulicht die Gebiete des stationären bzw. transienten Modells, in denen eine Berechnung des Strahlungstransports erfolgt. Die wesentlichen, für die Berechnung relevanten Randbedingungen, die in Tabelle 6.4 gelistet sind, sind in dieser Abbildung gekennzeichnet. Alle anderen geometrischen Ränder, die an die Gebiete 3), 4) und 5) angrenzen, besitzen eine Materialdiskontinuitäts-Randbedingung. An der Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes wird das Snelliussche Brechungsgesetz zur Neubestimmung des Wellenvektors verwendet.

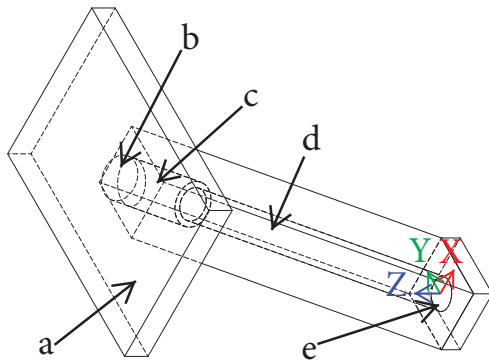


Abbildung 6.5: Gebiete des stationären bzw. transienten Modells der Wandkonstruktion WK4, in denen die Berechnung des Strahlungstransports erfolgt.

Tabelle 6.4: Randbedingungen für die Berechnung des Strahlungstransports.

Bezeichnung	Randbedingung
a	Strahlungseinlass
b	Materialdiskontinuität; $\tau = 0,9$
c	Wand; $\alpha = 0,196$
d	Wand; $\alpha = 0,507$
e	Wand; $\alpha = 0,895$

Die vom Strahlungseinlass (a, vgl. Abbildung 6.5) in Richtung des lichtleitenden Elements ausgehenden Lichtstrahlen werden in Form eines Konus, entsprechend Abbildung 6.6, ausgesandt. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Strahlen des Solarsimulators eine Parallelitätsabweichung von $\pm 2^\circ$ (halber Winkel) aufweisen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Diese Konen sind gleichmäßig auf dem Strahlungseinlass (a) verteilt und werden mathematisch durch eine Achse und einen Öffnungswinkel beschrieben.

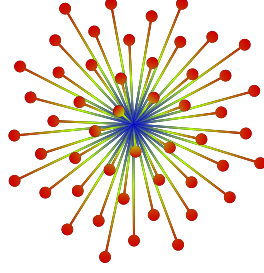


Abbildung 6.6: Vom Strahlungseinlass (a in Abbildung 6.5) ausgehende, konische Verteilung der Lichtstrahlen.

In dem in Abbildung 6.5 dargestellten Koordinatensystem wird die Achse eines Konus ($\mathbf{s}$) durch Gleichung (6.21) beschrieben.

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \sin(\psi) \\ -\cos(\varphi) \cos(\psi) \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

In Gleichung (6.21) bezeichnet φ den Polarwinkel (vgl. Abbildung 3.1a) und ψ den Azimut. In den experimentellen Prüfstandsuntersuchungen beträgt der Azimut des Solarsimulators grundsätzlich 0° , sodass sich Gleichung (6.21) zu Gleichung (6.22) vereinfacht.

$$\mathbf{s}_{\psi=0^\circ} = \begin{pmatrix} -\sin(\varphi) \\ 0 \\ -\cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

Der Öffnungswinkel des Konus entspricht, mit einem Winkel von 4° , der doppelten Parallelitätsabweichung der Strahlen des Solarsimulators. Die Fläche des Strahlungseinlasses (a in Abbildung 6.5) beträgt $5\text{ cm} \times 3,6\text{ cm}$ (A_{inlet}). Insgesamt werden 2000 Konen zu je 50 Strahlen pro Konus ($N_{\text{rays}} = 10^5$, 5556 rays/cm^2) verwendet, um die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Anzahl der Lichtstrahlen sicherzustellen. Die Leistung eines Strahls am Einlass ($\dot{Q}_{\text{ray,inlet}}$) wird mittels Gleichung (6.23) bestimmt.

$$\dot{Q}_{\text{ray,inlet}} = \frac{I_{S,\perp} A_{\text{inlet}}}{N_{\text{rays}}} \cos(\varphi) \cos(\psi) \quad (6.23)$$

Die Oberflächen des Borosilikatglaszylinders (b in Abbildung 6.5), die auf der Wandaußenseite hervorstehen, weisen einen Transmissionsgrad von 0,9 auf [145]. Die Flächen der Wandaußenseite (c), des lichtleitenden Elements (d) und des Absorbers (e) sind mit gemessenen kurzwelligen Absorptionsgraden von 0,196, 0,507 und 0,895 (vgl. Abschnitt 3.3) versehen. Die auf diese Flächen auftreffenden Strahlen werden diffus in alle Richtungen reflektiert.

6.2.2 Quantitative Vergleichskenngößen zwischen Experiment und Simulation

Um einen Vergleich der Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der zugehörigen transienten Simulation zu schaffen, werden die absolute mittlere und die absolute maximale Abweichung der betrachteten Größen als Kenngrößen verwendet. Die absolute mittlere Abweichung einer Größe (z. B. Temperaturdifferenz (ΔT)) über einen definierten Zeitraum (Δt) wird gemäß Gleichung (6.24) bestimmt.

$$\Delta \bar{T}|_t^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} (|\Delta T|) dt \quad (6.24)$$

Die absolute maximale Abweichung über einen konkreten Zeitraum wird durch $\text{MAX}(|\Delta T|)_t^{t+\Delta t}$ ermittelt.

6.3 Ergebnisse und Diskussion

In den folgenden Abschnitten werden wesentliche, für die sukzessive Validierung der Modelle der Wandkonstruktionen WK1, WK2 und WK4 notwendige, numerisch berechnete Ergebnisse dargestellt, diskutiert und mit den experimentellen Untersuchungen verglichen.

6.3.1 Wärmeleit- und -speicherverhalten von WK1

Bei WK1 handelt es sich um die Wandkonstruktion ohne Dämmsystem, weshalb, wie in Abschnitt 4.3.1 ausführlich diskutiert, in den Prüfstandsuntersuchungen nahezu ein eindimensionaler Wärmestrom zwischen der Wandinnen- und Wandaußenseite gemessen wurde. Im Folgenden sollen die in Abschnitt 6.2.1.1 beschriebenen 1D- und 3D-Modelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Vorhersage des solaren Gewinns (SG) und des Wärmeverlustreduktionsfaktors (HLRF) von WK1 (vgl. Abschnitt 5.2.2), welche von der tatsächlich zur Wandinnenseite geleiteten Wärmemenge abhängen, bewertet werden.

Abbildung 6.7 zeigt die gemessenen (exp) und simulierten (1D, 3D) Oberflächentemperaturen auf der Wandinnen- (IS) und Wandaußenseite (OS) sowie die Lufttemperaturen im Innen- (IC) und Außenbereich (OC). Zum Zeitpunkt $t = 0$ h erfolgt die achtstündige Bestrahlung der Wandaußenseite durch den Solarsimulator. Sowohl das 1D- als auch das 3D-Modell geben den Temperaturanstieg auf der Wandaußenseite (T_{OS}) bis zu einer Temperatur von $16,4^\circ\text{C}$ und den darauffolgenden Abfall zum Ausgangswert von 4°C in sehr guter Übereinstimmung wieder. Das bedeutet, dass die entsprechende Oberflächenenergiebilanz (Wärmefluss in die Wandkonstruktion, Absorption der kurzwelligigen Strahlung und konvektiv-radiative Wärmeabgabe zur Umgebung) hinreichend genau durch die Modelle wiedergegeben wird.

Die Temperatur auf der Wandinnenseite (T_{IS}) reagiert durch den Wärmespeichereffekt im Vollziegelmauerwerk zeitverzögert auf die absorbierte Solarstrahlung. Hierbei steigt die

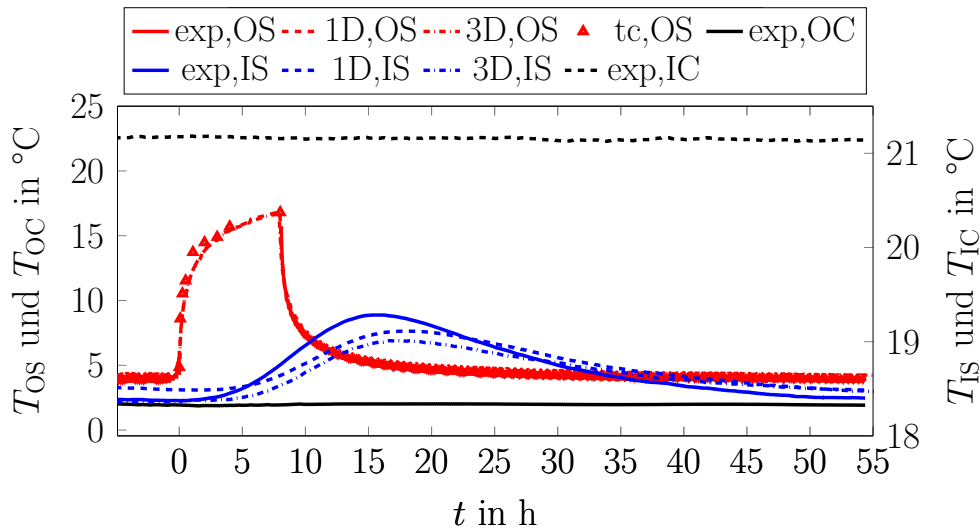


Abbildung 6.7: Gemessene (exp, tc) und simulierte (1D, 3D) wandinnen- (T_{IS}) und wandaußenseitige (T_{OS}) Oberflächentemperaturen der Wandkonstruktion WK1 sowie die gemessene Luftinnen- (T_{IC}) und Luftaußentemperatur (T_{OC}).

gemessene Temperatur von $18,4^{\circ}\text{C}$ auf $19,3^{\circ}\text{C}$, wobei sich die Temperaturdifferenz zur Luft im Innenbereich ($21,2^{\circ}\text{C}$) reduziert, sodass der wandinnenseitige Wärmestrom abnimmt. Beide Modelle geben den gemessenen Temperaturverlauf qualitativ gut wieder, wobei eine geringe Differenz von $0,1\text{ K}$ zu Beginn der Simulation zwischen dem 1D- ($18,5^{\circ}\text{C}$) und 3D-Modell ($18,4^{\circ}\text{C}$) vorhanden ist. Tabelle 6.5 listet die absolute mittlere ($\Delta\bar{T}_{IS}|_t^{t+\Delta t}$) und absolute maximale ($\text{MAX}(|\Delta T_{IS}|)_t^{t+\Delta t}$) Abweichung der wandinnenseitigen Oberflächentemperaturen zwischen dem Experiment und dem 1D- bzw. 3D-Modell auf. Der Auswertzeitraum umfasst den Bestrahlungsbeginn durch den Solarsimulator ($t = 0\text{ h}$) bis hin zum erneuten Erreichen des stationären Zustands ($t + \Delta t = 55\text{ h}$). Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 6.5 zeigt sich, dass nur äußerst geringe absolute Abweichungen ($\mathcal{O} \approx 0,1\text{ K}$) vorhanden sind und somit eine gute Reproduktion des Energiespeicher- und Energietransportverhaltens im Vollziegelmauerwerk erreicht wurde.

Tabelle 6.5: Absolute mittlere ($\Delta\bar{T}_{IS}|_t^{t+\Delta t}$) und absolute maximale ($\text{MAX}(|\Delta T_{IS}|)_t^{t+\Delta t}$) Abweichung der Oberflächentemperaturen auf der Wandinnenseite der Wandkonstruktion WK1 zwischen dem Experiment und dem 1D- bzw. 3D-Modell.

	exp - 1D	exp - 3D	1D - 3D
$\Delta\bar{T}_{IS} _0^{55}$ in K	0,1	0,1	0,1
$\text{MAX}(\Delta T_{IS})_0^{55}$ in K	0,2	0,3	0,1

Im Vergleich zum stationären Wärmestrom der experimentellen Untersuchungen zu Beginn der Bestrahlung ($25,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, vgl. Tabelle 5.6) beträgt dieser für das 1D- bzw. das 3D-Modell

$25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ bzw. $26,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, wodurch die oben genannten, geringen Unterschiede der Oberflächentemperaturen auf der Wandinnenseite erklärt werden können. Tabelle 6.6 fasst den ermittelten flächenspezifischen stationären und tatsächlichen Wärmeverlust (q_{st} bzw. q), den solaren Gewinn (SG) und den Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) für das Experiment und die numerischen Modelle zusammen. Die relative Abweichung des tatsächlichen Wärmeverlusts auf der Wandinnenseite zwischen dem Experiment und dem 1D- bzw. 3D-Modell, bezogen auf das Experiment, beträgt nur $\pm 1,7\%$. Die experimentell ermittelten Größen SG und HLRF werden, entsprechend Tabelle 6.6, durch das 3D-Modell von WK1 genauer wiedergegeben, da hier zusätzlich der stationäre flächenspezifische Wärmeverlust (q_{st}) der Wandkonstruktion einfließt. Für den SG betragen die relativen Abweichungen, in Bezug auf das Experiment, für das 1D- und 3D-Modell $-14,1\%$ bzw. $-3,1\%$. Darüber hinaus liegt auch der Wärmeverlustreduktionsfaktor mit $11,2\%$ (3D) gegenüber $10,4\%$ (1D) näher an dem experimentell ermittelten HLRF von $11,7\%$. Anhand dieser Vergleiche kann geschlussfolgert werden, dass eine dreidimensionale virtuelle Repräsentation von WK1 eine bessere Approximation der wandinnenseitigen Energieeinsparungen, ausgedrückt durch die Leistungsindikatoren SG und HLRF, ermöglicht.

Tabelle 6.6: Stationärer (q_{st}) und tatsächlicher (q) flächenspezifischer Wärmeverlust, solarer Gewinn (SG) und Wärmeverlustreduktionsfaktor (HLRF) für das Experiment, das 1D- und das 3D-Simulationsmodell von WK1.

	q_{st} in $\frac{\text{kW h}}{\text{m}^2}$	q in $\frac{\text{kW h}}{\text{m}^2}$	SG in $\frac{\text{kW h}}{\text{m}^2}$	HLRF in %
Experiment	1,402	1,239	0,163	11,7
1D	1,359	1,218	0,140	10,4
3D	1,418	1,260	0,158	11,2

6.3.2 Temperaturanstieg hinter der Dämmschicht und dimensionsloser Wärmestrom von WK2

Die Auswirkungen der bei WK2 hinzugefügten MHGK-Dämmschicht auf die solaren Gewinne und den Transmissionswärmeverlust in den Prüfstandsuntersuchungen wurden bereits ausführlich in Abschnitt 5.3.3 erörtert. Für die Modellentwicklung ist, neben der stationären Betrachtung aus Kapitel 4, auch das dynamische Verhalten der Dämmschicht von Bedeutung, d. h. die Wärmeleitung im Dämmmaterial beim Energieeinspeicher- und -ausspeichervorgang. In Bezug auf die mathematische Modellierung wird die transiente Wärmeleitungsdifferentialgleichung (6.1) auch im Bereich der Dämmschicht als Gebietsbedingung angesetzt.

Abbildung 6.8 zeigt die für den Bestrahlungsversuch unter 19° (vgl. Abschnitt 5.3.2) gemessene (exp) und berechnete (3D) Temperaturerhöhung hinter der Dämmschicht (TR)

sowie den dimensionslosen Wärmestrom auf der Wandinnenseite (DLHF). Bis zu einem Zeitpunkt von ca. 3 h nach Bestrahlungsbeginn stimmen die gemessene und simulierte Temperaturerhöhung nahezu überein. Anschließend reduziert sich der Gradient der simulierten Temperaturerhöhung, sodass nach 8 h Bestrahlungsdauer eine um 0,5 K geringere maximale Temperaturerhöhung vorliegt (1,7 K vs. 2,2 K). Die hieraus resultierende, geringere im Vollziegelmauerwerk eingespeicherte Energiemenge führt dazu, dass der berechnete Wärmestrom auf der Wandinnenseite, veranschaulicht durch den DLHF in Abbildung 6.8, das entsprechende Minimum des Experiments nicht erreicht. Über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet, betragen die absoluten mittleren Abweichungen der Temperaturerhöhung und des dimensionslosen Wärmestroms lediglich $\Delta \overline{TR}|_0^{55,5} = 0,1 \text{ K}$ bzw. $\Delta \overline{DLHF}|_0^{55,5} = 1,4 \%$.

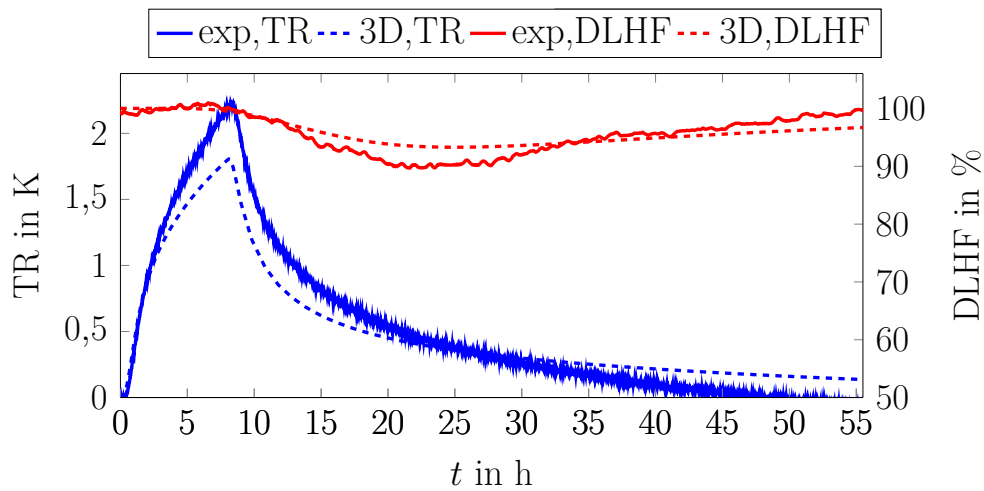


Abbildung 6.8: Temperaturerhöhung hinter der Dämmschicht (TR) und dimensionsloser Wärmestrom (DLHF) auf der Wandinnenseite von WK2.

6.3.3 Effektive Wärmeleitfähigkeit und Gesamtenergiedurchlassgrad des solarselektiven Wärmedämmsystems

Ein wesentliches Merkmal eines Dämmsystems sind nicht nur die Wärmeleitfähigkeiten der Einzelkomponenten, sondern auch deren thermisches Zusammenspiel, ausgedrückt durch eine sich über die Dämmschicht ergebende effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}). Diese Größe beschreibt die Wärmeleitfähigkeit eines homogenen Ersatzmaterials, durch das bei gleicher anliegender Temperaturdifferenz der gleiche Wärmestrom wie bei einem mehrkomponentigen Dämmsystem hindurchfließt. Viele transparente Wärmedämmsysteme beinhalten Glas oder Kunststoff (vgl. Abbildung 2.7 bzw. Tabelle A.2) in Form von Platten oder Zylindern, die, im Vergleich zu Luft bzw. einem herkömmlichen Dämmmaterial, eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen und somit als Wärmebrücken fungieren. Zur Minimierung der stationären Wärmeverluste muss daher der Anteil derartiger Materialien möglichst gering gehalten werden.

Für das solarselektive Wärmedämmsystem der Wandkonstruktion WK4 hängt die effektive Wärmeleitfähigkeit u. a. von folgenden Einflussgrößen ab:

1. Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials (MHGK-Dämmputz), des Verschlusselements (Glaszylinder) sowie der Luft.
2. Eindringtiefe des Glaskörpers.
3. Wärmestrahlung und natürliche Konvektion innerhalb des lichtleitenden Elements, welche wiederum von der Bohrungsgeometrie (Länge, Durchmesser) abhängen.
4. Flächenanteil der lichtleitenden Elemente, d. h. der relative Anteil an Glas und Luft an der Gesamtfläche.
5. Feuchtegehalt des Dämmputzes, d. h. Trocknungszeit der hergestellten Kapillarputzplatte sowie extern (z. B. feuchter Mörtel) eingebrachte Feuchte bei der Applikation des Systems an der Wand.

In den durchgeführten numerischen Berechnungen soll, zusätzlich zur Bestimmung von λ_{eff} , der relative Einfluss von Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung untersucht werden. Daher wird das stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 2 (vgl. Abbildung 6.3a) zunächst unter Berücksichtigung aller Wärmetransportmechanismen (cond-conv-rad), dann unter Wärmeleitung und Wärmestrahlung (cond-rad) und schließlich allein unter Wärmeleitung (cond) simuliert.

Abbildung 6.9 zeigt die experimentell (exp) und numerisch (num) bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeiten des SATIS Prototyps in Stadium 2, wobei in der Simulation die oben genannte Variation der berücksichtigten Wärmetransportmechanismen vorgenommen wurde. Vergleicht man die experimentell ermittelten λ_{eff} mit Stadium 1 ($45 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$), dann ist für alle untersuchten Temperaturdifferenzen eine Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeiten erkennbar. Darüber hinaus kann ein Anstieg von $48 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ auf $50 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ bei zunehmender Kammerlufttemperaturdifferenz von $\Delta T_{\text{IC-OC},1}$ auf $\Delta T_{\text{IC-OC},3}$ (vgl. Tabelle 5.1) festgestellt werden.

Bei Miteinbeziehung aller Wärmetransportmechanismen in der numerischen Simulation (cond-conv-rad) ergeben sich effektive Wärmeleitfähigkeiten von $48,4 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$, $48,5 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ und $48,7 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$, die gut mit den experimentell bestimmten λ_{eff} übereinstimmen. Wird die Fluidbewegung innerhalb des lichtleitenden Elements vernachlässigt und werden nur Wärmeleitung und Wärmestrahlung (cond-rad) berücksichtigt, ergeben sich nur um $0,3 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ reduzierte effektive Wärmeleitfähigkeiten für jede Kammerlufttemperaturdifferenz. Dies kann auf den flachen Anstellwinkel der lichtleitenden Elemente zur Horizontalen (19°) und die geringen Durchmesser der Stufenbohrung (8 mm bzw. 6 mm) zurückgeführt werden. Diese konstruktiven Merkmale führen, wie in Abbildung 6.10 beispielhaft für die höchste Kammerlufttemperaturdifferenz

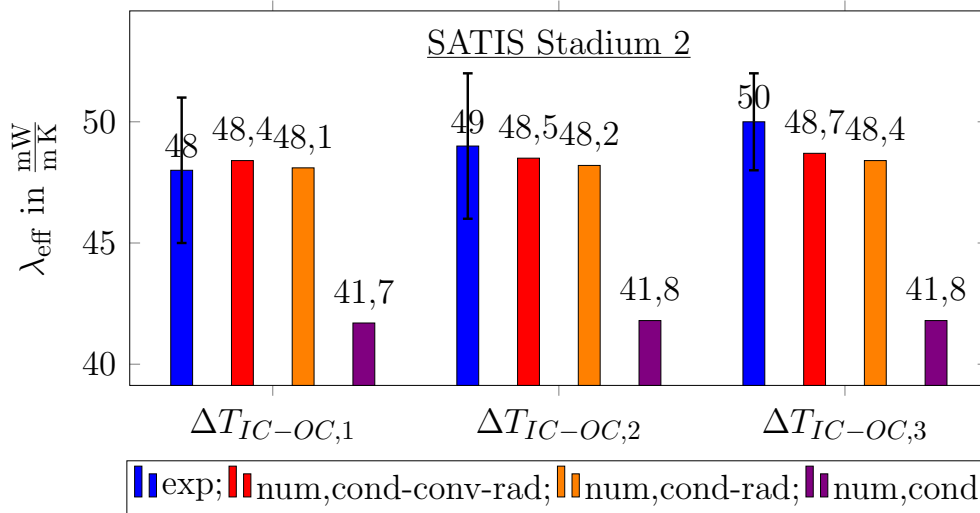


Abbildung 6.9: Experimentell (exp) und numerisch (num) bestimmte effektive Wärmeleitfähigkeiten (λ_{eff}) des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 2 für die Kammerlufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1 unter Berücksichtigung von Wärmeleitung (cond), Konvektion (conv) und Wärmestrahlung (rad).

$\Delta T_{\text{IC-OC},3}$ aus Tabelle 5.1 dargestellt, zu äußerst geringen Fluidgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

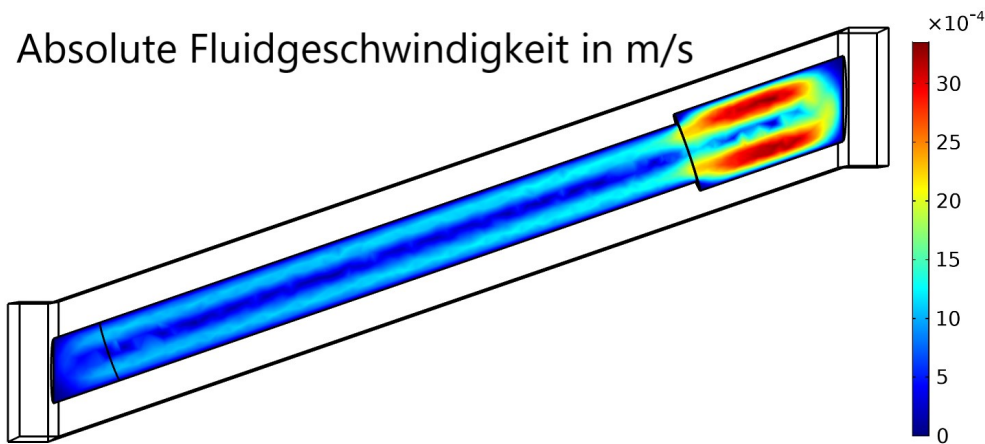


Abbildung 6.10: Absolute Fluidgeschwindigkeit innerhalb des lichtleitenden Elements des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 2 für die höchste untersuchte Kammerlufttemperaturdifferenz $\Delta T_{\text{IC-OC},3}$ aus Tabelle 5.1.

Eine Vernachlässigung der Wärmestrahlung und somit eine ausschließliche Berücksichtigung der Wärmeleitung (cond) resultiert in zu geringen Wärmeleitfähigkeiten von rund $42 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ im Vergleich zu den Experimenten. Aus diesen Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass die langwellige Wärmestrahlung innerhalb des lichtleitenden Elements miteinbezogen werden muss, da diese einen entscheidenden Einfluss auf λ_{eff} hat.

Das stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 (vgl. Ab-

bildung 6.3b), welches das Verschlusselement aus Borosilikatglas beinhaltet, soll ebenfalls validiert werden. Hier wird nur die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung (cond-rad) in den Simulationen berücksichtigt, da die natürliche Konvektion nur einen geringen Effekt auf λ_{eff} gezeigt hat. Zudem ist das Gebiet, in dem die betragsmäßig höchsten Fluidgeschwindigkeiten in Stadium 2 auftreten (vgl. Abbildung 6.10), aufgrund des eingebrachten Glaskörpers nicht mehr vorhanden.

Abbildung 6.11 zeigt die experimentell (exp) und numerisch (num) ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3. Die Einbringung des Verschlusselements führte zur Zunahme der experimentellen λ_{eff} von $48 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$, $49 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ und $50 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ (Stadium 2) auf $57 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$, $57 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ und $58 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ (Stadium 3), da das Glas, welches eine Wärmeleitfähigkeit von $1,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ aufweist [145], als Wärmebrücke fungiert und die Dämmwirkung des solarselektiven Prototyps weiter reduziert. Wie aus Abbildung 6.11 deutlich wird, konnte auch in Stadium 3 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentell und numerisch ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten erzielt werden.

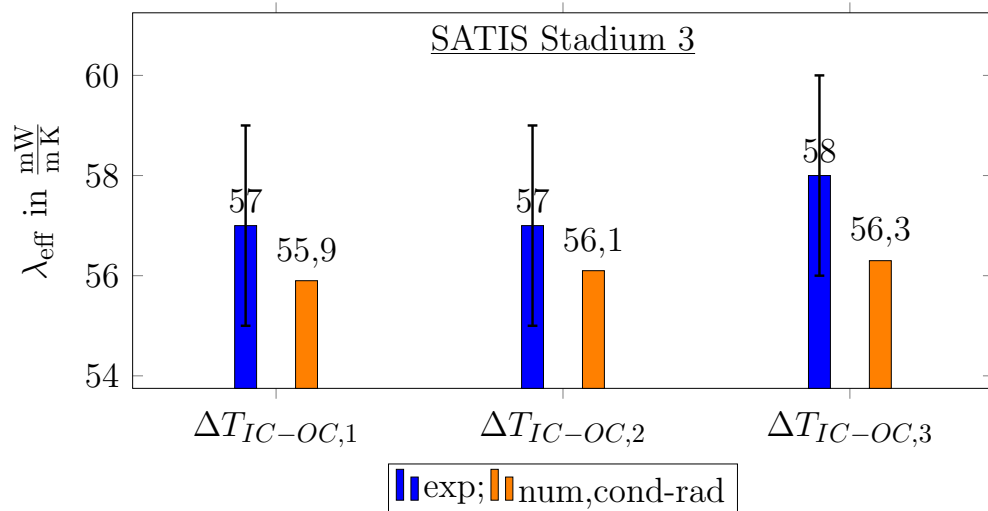


Abbildung 6.11: Experimentell (exp) und numerisch (num) bestimmte effektive Wärmeleitfähigkeiten (λ_{eff}) des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 für die Kammerlufttemperaturdifferenzen aus Tabelle 5.1 unter Berücksichtigung von Wärmeleitung (cond) und Wärmestrahlung (rad).

Aus diesen Untersuchungen kann die bereits in Abschnitt 5.3.3 erwähnte, gegenüber WK2 ($10,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) um 27 % höhere gemessene stationäre Wärmestromdichte von WK4 ($13,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) erklärt werden, wobei zusätzlich die Erhöhung von λ_{eff} durch die eingebrachte Feuchtigkeit des Absorber-Klebemörtels berücksichtigt werden muss. Hierbei wurde mittels des in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellten Parameteridentifikationsverfahrens eine effektive Wärmeleitfähigkeit des solarselektiven Wärmedämmsystems im feuchten Zustand bei der Applikation auf das Vollziegelmauerwerk (WK4) von $68 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ ermittelt. Da auch im trockenen Zustand die effektive Wärmeleitfähigkeit des Prototyps des solarselektiven Wärmedämmsystems ($57 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$)

höher als die des reinen MHGK-Wärmedämmputzes ($45 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$) ist, werden in Kapitel 7 die konstruktiven Einflussfaktoren auf den Wärmeverlust detailliert untersucht und Empfehlungen zur weiteren Verbesserung des solarselektiven Wärmedämmsystems gegeben.

Abbildung 6.12 zeigt den experimentell (exp, vgl. Abschnitt 5.3.1) und numerisch (num) bestimmten Gesamtenergiedurchlassgrad (g) für die untersuchten Einstrahlwinkel (φ) aus Tabelle 5.2 für das stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3 (vgl. Abbildung 6.3b). Vergleicht man g bei 14° und 24° , kann im Gesamtenergiedurchlassgrad experimentell eine Differenz (8,2 % vs. 7,7 %) beobachtet werden, obwohl beide Einstrahlwinkel eine Distanz von 5° ausgehend vom Auslegungswinkel (19°) aufweisen. Dieses Phänomen kann auch in den Simulationen beobachtet werden (8,6 % vs. 8,2 %). Dieses Verhalten ist ein Anzeichen dafür, dass für Einstrahlwinkel kleiner des Auslegungswinkels, aufgrund von Asymmetrien, mehr Solarstrahlung in das lichtleitende Element eindringen kann. Diese Asymmetrien resultieren aus der Schrägstellung der Bohrungsachse und dem höheren Anteil herausragender Glaszylindermantelfläche auf der Unterseite gegenüber der Oberseite. Insbesondere in der unmittelbaren Umgebung des Auslegungspunkts kann das Simulationsmodell die experimentellen Gesamtenergiedurchlassgrade gut wiedergeben, was quantitativ durch eine geringe mittlere Abweichung von 5,6 % im Einstrahlwinkelbereich von 14° bis 24° ausgedrückt wird. Wie aus der Abbildung deutlich wird, unterschätzt das Simulationsmodell g mit zunehmendem Einstrahlwinkel. Das bedeutet, dass in der Simulation, im Vergleich zum Experiment, zu wenig Solarstrahlung zum Absorber geleitet wird bzw. der Wärmeleitungs- und langwellige Strahlungsanteil zu gering ausfällt. Gründe hierfür werden im nachfolgenden Abschnitt 6.3.4, welcher die transienten numerischen Untersuchungen von WK4 thematisiert, näher erläutert, da auch hier eine Unterschätzung des berechneten Energieeintrags bei höheren Einstrahlwinkeln festgestellt wurde.

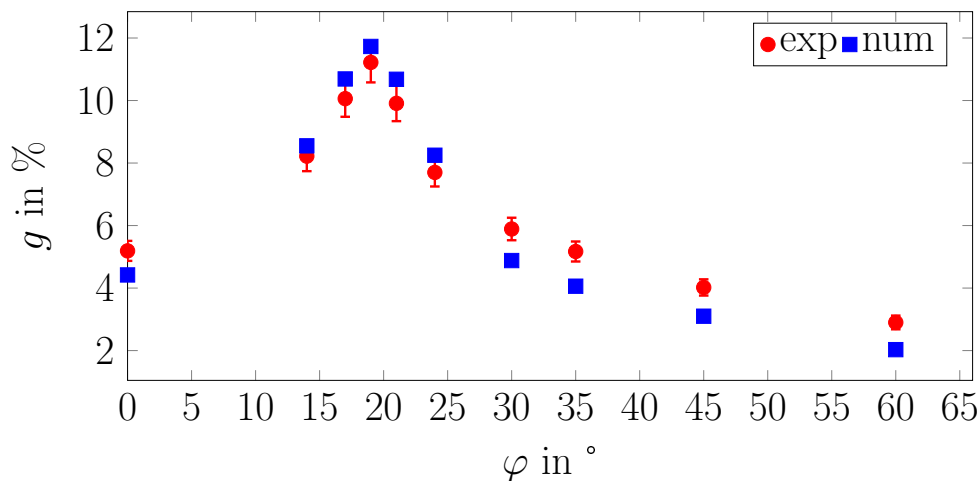


Abbildung 6.12: Experimentell (exp) and numerisch (num) bestimmter Gesamtenergiedurchlassgrad (g) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ) für das stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems in Stadium 3.

6.3.4 Dynamischer Strahlungs- und Wärmetransport von WK4

Die in Abschnitt 6.3.3 vorgestellten stationären Untersuchungen am solarselektiven Wärmedämmsystem werden im Folgenden durch transiente Berechnungen ergänzt. Gegenstand der Untersuchungen ist das am Vollziegelmauerwerk applizierte solarselektive Wärmedämmsystem (WK4). Das Hauptaugenmerk der numerischen Untersuchungen liegt auf der dynamischen Energieeinspeicherung und den winkelabhängigen solaren Gewinnen. Die Berechnung des transienten Modells aus Abschnitt 6.2.1.2 erfolgt ähnlich zu der des stationären Modells. Zunächst werden hierbei die Bestrahlungsvorgänge der Prüfstandsuntersuchungen unter verschiedenen Einstrahlwinkeln (vgl. Tabelle 5.3) virtuell mittels Ray Tracing nachgebildet, um die Strahlungsverteilung innerhalb des lichtleitenden Elements zu ermitteln.

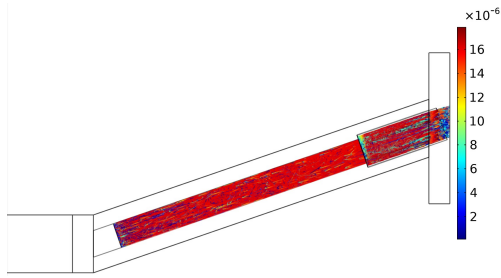
Die quantitative Beurteilung dieser Verteilung innerhalb des lichtleitenden Elements wird mit einer neu eingeführten Kenngröße, die als dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung (DARD) bezeichnet wird, vorgenommen. Die DARD, die nach Gleichung (6.25) berechnet wird, liefert die dimensionslose Verteilung der absorbierten Strahlungsleistung über die Länge des lichtleitenden Elements, ausgehend von der Absorber-Klebeschicht ($z_{\min}$) bis zur Außenoberfläche der Wand ($z_{\max}$).

$$\text{DARD}(z) = \frac{\sum_{z=z_{\min}}^z \dot{Q}_{\text{ray}}}{\sum_{z=z_{\min}}^{z_{\max}} \dot{Q}_{\text{ray}}} \quad (6.25)$$

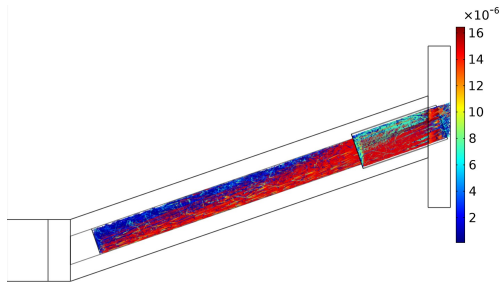
In Gleichung (6.25) bezeichnet $\dot{Q}_{\text{ray}}$ den gesamten Wandwärmestrom, welcher sich aus der Summe der absorbierten Leistungen aller Strahlen ergibt, die auf ein spezifisches Oberflächenelement auftreffen. Anhand der DARD kann die winkelabhängige Wirkung der lichtleitenden Elemente, d. h. die Erzeugung solarer Gewinne bei tiefstehender Sonne und die Vermeidung von Überhitzungseffekten bei hohem Sonnenstand, bewertet werden. Die durch Ray Tracing berechnete, örtlich variable Strahlungsverteilung wird zur Ermittlung der Wandwärmeströme im lichtleitenden Element und auf der Wandaußenseite verwendet. Diese Wärmeströme ($\dot{q}_b$) werden über die gesamte Bestrahlungsdauer von 8 h als konstant betrachtet und, gemäß Gleichung (6.14), im zweiten Schritt als Wärmestromrandbedingung bei der Berechnung des transienten Wärmetransports verwendet.

Strahlungstransport WK4

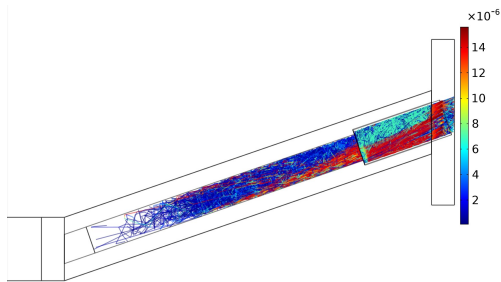
Abbildung 6.13 stellt sowohl visuell (a, c, e, g) als auch quantitativ (b, d, f, h) die berechnete Strahlungsleistung sowie den gesamten Wandwärmestrom ($\dot{Q}_{\text{ray}}$) im lichtleitenden Element für die Einstrahlwinkel von 19°, 24°, 30° und 50° dar. Neben dem gesamten Wandwärmestrom zeigen die Abbildungen 6.13b, 6.13d, 6.13f und 6.13h auch die dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung (DARD) entlang der z-Achse (Wandnormale) im lichtleitenden Element, die nach Gleichung (6.25) berechnet wird. Vergleicht man die Abbildungen 6.13a und



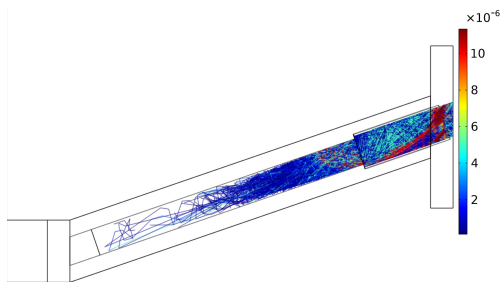
(a) Strahlungsleistung (Einheit: W) innerhalb des lichtleitenden Elements bei einem Einfallswinkel von 19° .



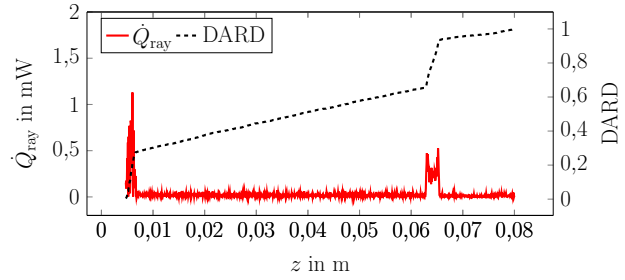
(c) Strahlungsleistung (Einheit: W) innerhalb des lichtleitenden Elements bei einem Einfallswinkel von 24° .



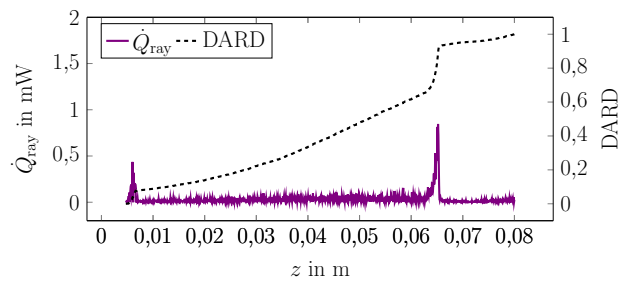
(e) Strahlungsleistung (Einheit: W) innerhalb des lichtleitenden Elements bei einem Einfallswinkel von 30° .



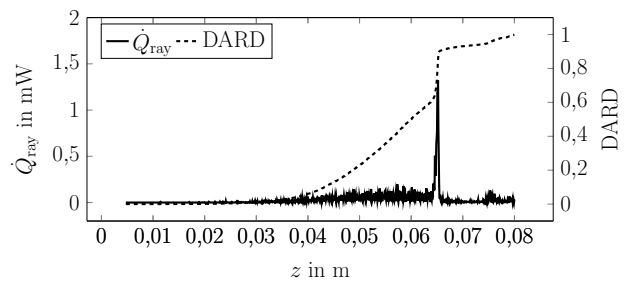
(g) Strahlungsleistung (Einheit: W) innerhalb des lichtleitenden Elements bei einem Einfallswinkel von 50° .



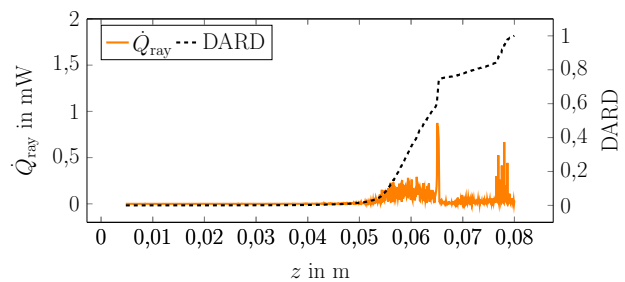
(b) Gesamter Wandwärmestrom und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung für einen Einfallswinkel von 19° .



(d) Gesamter Wandwärmestrom und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung für einen Einfallswinkel von 24° .



(f) Gesamter Wandwärmestrom und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung für einen Einfallswinkel von 30° .



(h) Gesamter Wandwärmestrom und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung für einen Einfallswinkel von 50° .

Abbildung 6.13: Strahlungsleistung, gesamter Wandwärmestrom ($\dot{Q}_{\text{ray}}$) und dimensionslose akkumulierte Strahlungsverteilung (DARD) innerhalb des lichtleitenden Elements für verschiedene Einfallswinkel.

6.13g, wird deutlich, dass bei einem Einfallswinkel von 19° mehr Strahlen mit höherer Strahlungsleistung zum Absorber-Klebemörtel geleitet und von diesem absorbiert werden. Bei einem Einfallswinkel von 50° treffen die Strahlen, die den Borosilikatglaszylinder durchdringen, vor allem auf die an diesen Zylinder angrenzenden Flächen. Durch Reflexionen im Inneren des lichtleitenden Elements können, trotz des steilen Einfallswinkels, einige Lichtstrahlen in Richtung des Absorber-Klebemörtels geleitet werden. Diese Strahlen sind jedoch, im Vergleich zu denen bei 19° , auf einem erheblich niedrigeren Energieniveau, wie aus den Abbildungen 6.13a und 6.13g hervorgeht.

Die Abbildungen 6.13b, 6.13d, 6.13f und 6.13h zeigen den gesamten Wandwärmestrom ($\dot{Q}_{\text{ray}}$) für die Einfallswinkel von 19° , 24° , 30° und 50° . Dieser Wärmestrom wird aus der absorbierten Leistung aller Strahlen berechnet, die auf ein bestimmtes Oberflächenelement innerhalb des lichtleitenden Elements auftreffen. Für einen Einfallswinkel von 19° können in Abbildung 6.13b zwei Peak-Bereiche identifiziert werden. Der erste Peak-Bereich befindet sich an der Oberfläche des Absorber-Klebemörtels, bei dem ein maximaler Wandwärmestrom von 1,1 mW auftritt. Der zweite Peak-Bereich befindet sich in der Übergangszone, in der sich der Durchmesser der Stufenbohrung von 8 mm auf 6 mm reduziert. Hier wird die Querschnittsfläche des lichtleitenden Elements um 44 % verkleinert, sodass eine große Anzahl an Lichtstrahlen, die den Glaszylinder durchdringen, auf den Bohrungsabsatz treffen. In Abbildung 6.13h wird bei einem Einfallswinkel von 50° nahezu die gesamte Strahlungsleistung von den an den Borosilikatglaszylinder angrenzenden Flächen absorbiert. Hier beträgt der maximale gesamte Wandwärmestrom 0,9 mW.

In Abbildung 6.13b zeigt die DARD für den Winkel von 19° , dass 27 % der gesamten Strahlungsleistung von der Oberfläche des Klebemörtels absorbiert wird. Mit Ausnahme der Bereiche des Absorber-Klebemörtels und der Übergangszone, in der sich der Bohrungsdurchmesser von 8 mm auf 6 mm reduziert, zeigt die DARD einen nahezu konstanten Gradienten, was darauf hinweist, dass die Oberflächen im lichtleitenden Element in diesen Regionen einem nahezu konstanten Gesamtwandwärmestrom ausgesetzt sind. In der Übergangszone weist die DARD einen sprunghaften Anstieg von 66 % auf 92 % auf. Bei einem Einfallswinkel von 50° erhöht sich die DARD von 0,03 bei $z = 0,053$ m auf 1 bei $z = 0,08$ m, was der Außenoberfläche der Wand entspricht. Dies bedeutet, dass 97 % der Strahlungsleistung von den an den Borosilikatglaszylinder angrenzenden Oberflächen absorbiert wird.

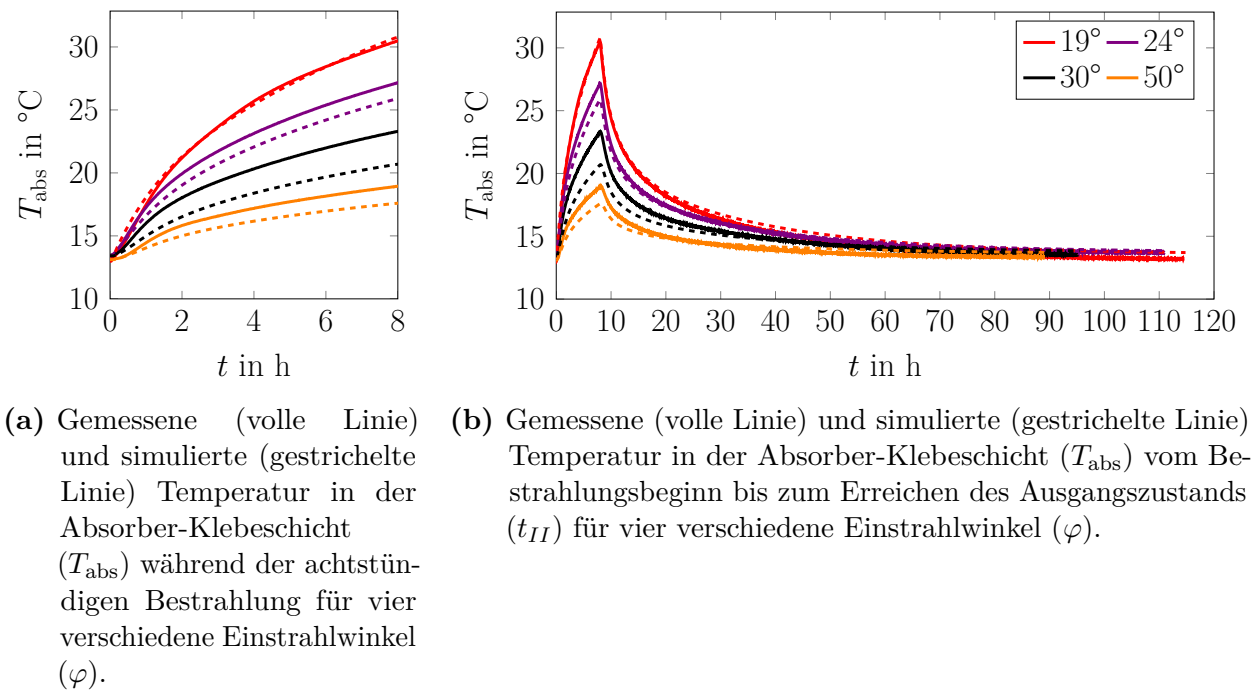
Anhand dieser winkelabhängigen Strahlungsverteilungen im lichtleitenden Element kann, in Übereinstimmung mit den stationären Untersuchungen aus Abschnitt 6.3.3, festgestellt werden, dass nur in einem begrenzten Winkelbereich um den Auslegungspunkt von 19° eine Strahlungsleitung zum Absorber erfolgt. Im Gegensatz zu den in Abbildung 2.8 dargestellten Transmissionsgraden verschiedener transparenter Wärmedämmmaterialien, die allesamt einen über einen weiten Winkelbereich nahezu konstanten Wert aufweisen, kann durch das solarselektive System der gewünschte Wirkungsbereich der Solarstrahlungsleitung deutlich

eingegrenzt werden, um somit der sommerlichen Überhitzung effektiv entgegenzuwirken.

Wärmetransport WK4 (Modellvalidierung)

Zur Berechnung des transienten Wärmetransports in der Wandkonstruktion WK4 werden die entsprechenden Wandwärmeströme der Ray Tracing-Simulation verwendet. Die Wärmestromrandbedingung aus der Strahlungssimulation (Gleichung (6.14)) ist nur während der ersten 8 h aktiv, da nur in diesem Zeitraum die Bestrahlung durch den Solarsimulator erfolgt.

Abbildung 6.14 veranschaulicht die gemessene (volle Linie) und numerisch berechnete (gestrichelte Linie) Temperatur in der Absorberschicht für die Einstrahlwinkel von 19°, 24°, 30° und 50°. Abbildung 6.14a zeigt die ersten 8 h nach Bestrahlungsbeginn, in denen der Solarsimulator die Wandkonstruktion WK4 bestrahlt bzw. in denen die über Ray Tracing ermittelte Strahlungsverteilung im lichtleitenden Element aktiv ist.



(a) Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur in der Absorber-Klebeschicht (T_{abs}) während der achtstündigen Bestrahlung für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ). (b) Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur in der Absorber-Klebeschicht (T_{abs}) vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Abbildung 6.14: Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur im Absorber-Klebemörtel (T_{abs}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Wie aus Abbildung 6.14a deutlich wird, geben die Simulationsergebnisse auf Basis eines lichtleitenden Elements die Messungen am realen Untersuchungsobjekt qualitativ gut wieder. Für den Einstrahlwinkel von 19° liegt zu Beginn ein etwas steilerer Anstieg der simulierten Temperatur gegenüber dem Experiment vor. Auch die Zeitverzögerung im Temperaturanstieg bei 50°, die auf die Wärmeleitung von den an den Glaszylinder angrenzenden Oberflächen zum Absorber zurückzuführen ist, wird gut wiedergegeben. Die absolute mittlere Abweichung

der gemessenen und simulierten Temperaturen in der Absorber-Klebeschicht innerhalb der ersten 8 h ($\Delta \bar{T}_{\text{abs}}|_0^8$), die nach Gleichung (6.24) berechnet wird, ist in Tabelle 6.7 aufgeführt. Das Verhältnis zwischen dieser Größe und der maximal gemessenen Temperaturerhöhung (vgl. TR_{max} aus Tabelle 5.5) gibt an, wie gut die gemessenen und simulierten Temperaturen, relativ zur maximalen Temperaturerhöhung, übereinstimmen.

Tabelle 6.7: Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), absolute mittlere Abweichungen der gemessenen und simulierten Temperaturen in der Absorber-Klebeschicht ($\Delta \bar{T}_{\text{abs}}|_0^8$ und $\Delta \bar{T}_{\text{abs}}|_0^{t_{II}}$) sowie die zugehörigen maximalen Abweichungen ($\text{MAX}(|\Delta T_{\text{abs}}|)_0^8$ und $\text{MAX}(|\Delta T_{\text{abs}}|)_0^{t_{II}}$) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ).

φ in °	t_{II} in h	$\Delta \bar{T}_{\text{abs}} _0^8$ in K	$\text{MAX}(\Delta T_{\text{abs}})_0^8$ in K	$\Delta \bar{T}_{\text{abs}} _0^{t_{II}}$ in K	$\text{MAX}(\Delta T_{\text{abs}})_0^{t_{II}}$ in K
19	114,8	0,2	0,8	0,4	1,2
24	111,2	1,0	1,3	0,2	1,3
30	95,5	1,8	2,6	0,5	2,6
50	89,4	0,9	1,4	0,4	1,4

Für die Winkel von 19° und 24° beträgt dieses Verhältnis 0,2 K/17,5 K=1,1 % bzw. 1 K/13,8 K=7,2 %, was einer sehr guten Übereinstimmung entspricht. Für die höheren Einstrahlwinkel von 30° und 50° ergeben sich Verhältnisse von 1,8 K/9,9 K=18,2 % und 0,9 K/5,8 K=15,5 %. Diese größeren Zahlenwerte äußern sich, wie Abbildung 6.14a zeigt, in einer Unterschätzung der experimentell ermittelten Temperaturerhöhung in der Absorberschicht. Die höheren Abweichungen bei größeren Einstrahlwinkeln, die auch in den stationären Untersuchungen (vgl. Abbildung 6.12) auftraten, machen deutlich, dass für derartige Simulationen, in denen der Wärmetransport vorwiegend von der Oberfläche nahe des Verschlusselements zum Absorber erfolgt, ein Modell eines einzelnen lichtleitenden Elements zur Nachbildung der Prüfstandsversuche nur bedingt geeignet ist. Stattdessen ist hier - trotz eines erheblich höheren Berechnungsaufwands - ein großskaliges Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems bzw. der Wandkonstruktion WK4 zu empfehlen. Hierdurch können die Interaktionen der lichtleitenden Elemente untereinander sowie die Randeffekte, die in den Prüfstandsuntersuchungen präsent sind, in die numerischen Untersuchungen miteinbezogen werden.

Abbildung 6.14b zeigt den gemessenen und simulierten Temperaturverlauf in der Absorber-Klebeschicht vom Bestrahlungsbeginn bis zum erneuten Erreichen des stationären Zustands (t_{II}). Nachdem die Bestrahlung durch den Solarsimulator nach 8 h beendet wird, erfolgt ein unmittelbarer Temperaturabfall, der, ausgehend von der maximalen Temperatur in der Absorberschicht, durch das transiente Simulationsmodell gut wiedergegeben wird. Vergleicht man die Langzeit-Temperaturverläufe bei 19° und 24°, bei denen die gemessenen und simulierten maximalen Temperaturerhöhungen nahezu übereinstimmen, erkennt man, dass

während des Abfalls die simulierten Temperaturen nur geringfügig höher als die gemessenen sind.

Vergleicht man die absolute mittlere Abweichung der Temperatur in der Absorberschicht vom Bestrahlungsbeginn bis zum erneuten Erreichen des stationären Zustands ($\Delta\bar{T}_{\text{abs}}|_0^{t_{II}}$) mit der zugehörigen Größe über den Bestrahlungszeitraum ($\Delta\bar{T}_{\text{abs}}|_0^8$) für die Einstrahlwinkel von 24° , 30° und 50° , konnte die Langzeitabweichung deutlich reduziert werden.

Die Temperaturerhöhung in der Absorberschicht beeinflusst zeitverzögert die Oberflächentemperatur auf der Wandinnenseite (T_{IS}) der Wandkonstruktion WK4, wie aus Abbildung 6.15 hervorgeht. Auch hier entsprechen die vollen Linien den Messungen und die gestrichelten den Simulationsergebnissen. Ähnlich zur Temperatur in der Absorberschicht, geben die Einstrahlwinkel von 19° und 24° den Anstieg zum Maximum sowie den nachfolgenden Abfall sehr gut wieder. Der Unterschied in den gemessenen und simulierten Peak-Oberflächentemperaturen beträgt lediglich $0,1\text{ K}$ für 19° und 24° . Für 30° und 50° wirkt sich die Unterschätzung der Temperaturerhöhung in der Absorber-Klebeschicht kausal auf die gegenüber der Messung reduzierte Temperatur auf der Wandinnenseite aus, da insgesamt weniger Energie ins Vollziegelmauerwerk eingespeichert und zur Wandinnenseite transportiert wurde. Trotz dieser Tatsache ergeben sich entsprechend Tabelle 6.8 äußerst geringe absolute mittlere Abweichungen für alle Einstrahlwinkel über den gesamten Untersuchungszeitraum ($\Delta\bar{T}_{\text{IS}}|_0^{t_{II}} \leq 0,1\text{ K}$).

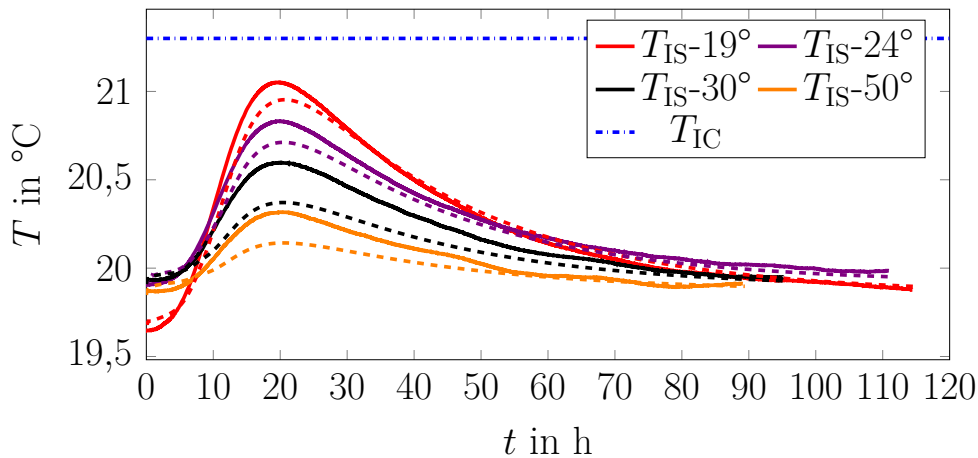


Abbildung 6.15: Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperatur auf der Wandinnenseite (T_{IS}) vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) sowie die Luftinnentemperatur (T_{IC}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Die Temperaturerhöhung auf der Wandinnenseite reduziert die entsprechende Temperaturdifferenz zur Luft im Innenbereich (T_{IC} , vgl. Abbildung 6.15), was zur Abnahme des von der Luft an die Oberfläche übertragenen Wärmestroms führt. Abbildung 6.16 zeigt die gemessenen (volle Linie) und berechneten (gestrichelte Linie) Wärmestromdichten auf

Tabelle 6.8: Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands (t_{II}), absolute mittlere Abweichungen der gemessenen und simulierten Temperaturen und Wärmestromdichten auf der Wandinnenseite ($\Delta \bar{T}_{IS}|_0^{t_{II}}$ und $\Delta \bar{q}|_0^{t_{II}}$) sowie die zugehörigen absoluten maximalen Abweichungen ($\text{MAX}(|\Delta T_{IS}|)_0^{t_{II}}$ und $\text{MAX}(|\Delta \dot{q}|)_0^{t_{II}}$) bei verschiedenen Einstrahlwinkeln (φ).

φ in $^\circ$	t_{II} in h	$\Delta \bar{T}_{IS} _0^{t_{II}}$ in K	$\Delta \bar{q} _0^{t_{II}}$ in $\frac{W}{m^2}$	$\text{MAX}(\Delta T_{IS})_0^{t_{II}}$ in K	$\text{MAX}(\Delta \dot{q})_0^{t_{II}}$ in $\frac{W}{m^2}$
19	114,8	0,0	0,2	0,1	1,6
24	111,2	0,0	0,4	0,1	1,1
30	95,5	0,1	0,8	0,2	2,1
50	89,4	0,1	0,6	0,2	1,5

der Wandinnenseite ($\dot{q}_{IS}$). Die quantitative Übereinstimmung dieser Größe ist eng mit der Qualität der wandinnenseitigen Oberflächentemperatur verknüpft. Hieraus folgt, dass sowohl die Minima als auch die zugehörigen Zeitpunkte für 19° und 24° in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden können. Die absoluten mittleren Abweichungen vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des stationären Ausgangszustands ($\Delta \bar{q}|_0^{t_{II}}$) betragen für alle Winkel maximal $0,8 \frac{W}{m^2}$.

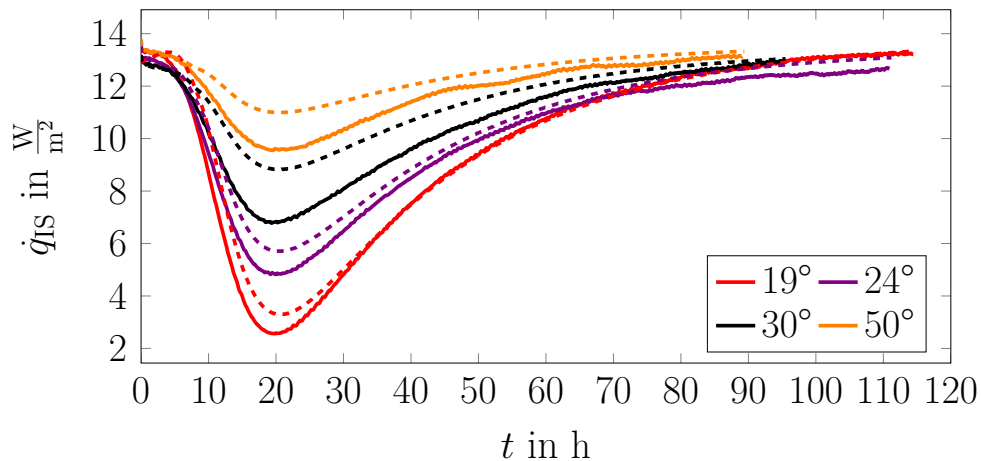
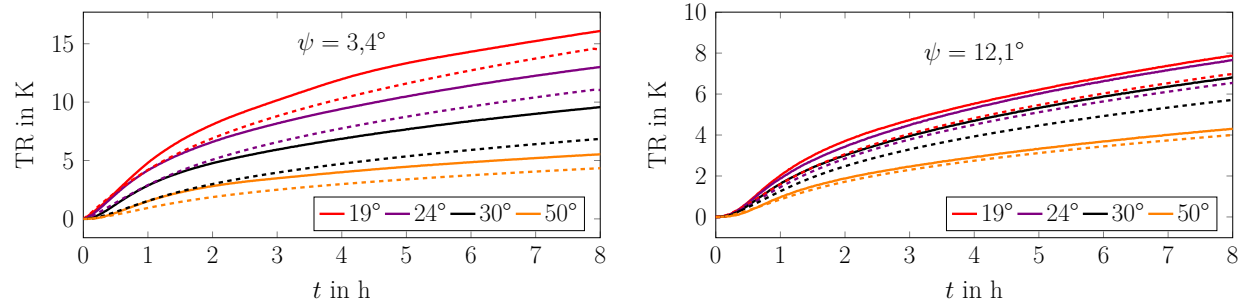


Abbildung 6.16: Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{IS}$) vom Bestrahlungsbeginn bis zum Erreichen des Ausgangszustands (t_{II}) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Wärmetransport WK4 - Azimut-Einfluss (Modellvalidierung)

Die Abbildungen 6.17a und 6.17b zeigen die gemessenen (volle Linie) und simulierten (gestrichelte Linie) Temperaturerhöhungen in der Absorberschicht (TR) während des Bestrahlungszeitraums von 8 h für WK4-3.4 bzw. WK4-12.1 (vgl. Abschnitt 3.3.5) bei den Einstrahlwinkeln von 19° , 24° , 30° und 50° [148]. Durch die zusätzliche Ost-West-Schrägstellung erfolgen vermehrt Interaktionen der ins lichtleitende Element eingebrachten Strahlen mit

den Oberflächen des Dämmputzes, sodass insgesamt eine geringere Strahlungsleistung von der Absorber-Klebeschicht aufgenommen werden kann. Wie in den Abbildungen zu erkennen ist, werden die entsprechenden charakteristischen Verläufe und auch die Annäherung der Kurven bei $\psi = 12,1^\circ$ durch das Simulationsmodell sehr gut wiedergegeben.



(a) Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) während der Bestrahlung über 8 h für WK4-3.4 ($\psi = 3,4^\circ$). (b) Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) während der Bestrahlung über 8 h für WK4-12.1 ($\psi = 12,1^\circ$).

Abbildung 6.17: Gemessene (volle Linie) und simulierte (gestrichelte Linie) Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) für die zwei Varianten WK4-3.4 und WK4-12.1.

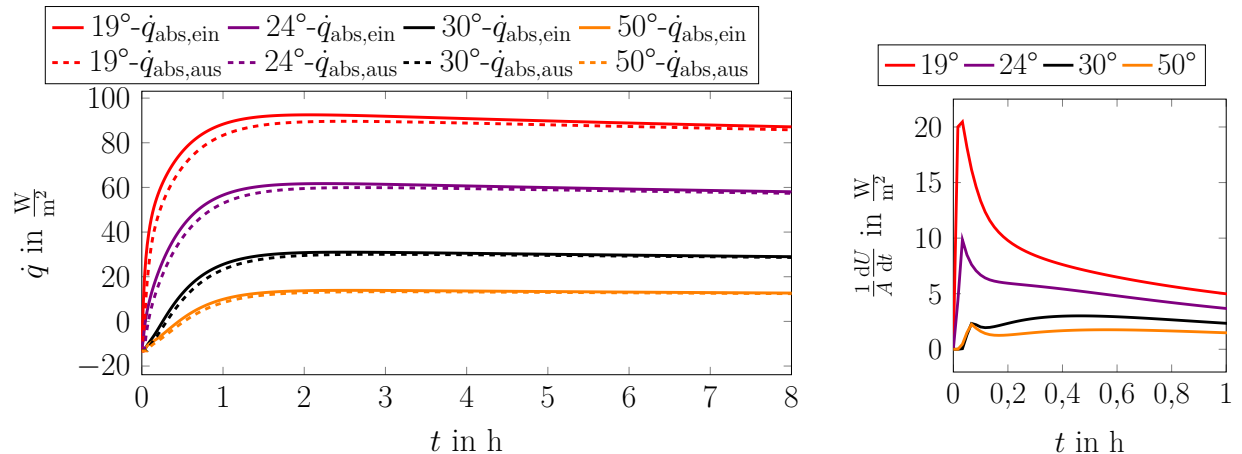
Wärmetransport WK4 - Energetische Bilanzierung der Absorberschicht

Das im Verlauf dieses Abschnitts in mehrerer Hinsicht validierte Modell der solarselektiven Wandkonstruktion WK4 wird nun für eine bilanzielle Betrachtung der Energieströme in der Absorberschicht herangezogen. Die in Kapitel 5 definierte Leistungskenngröße der Temperaturerhöhungsrates in der Absorberschicht (TRR, vgl. Abbildung 5.7) ist entsprechend Gleichung (5.12) direkt proportional zur zeitlichen Änderung der inneren Energie der Absorberschicht ($\frac{dU}{dt}$), die wiederum aus der Differenz zwischen dem ein- ($\dot{Q}_{\text{abs,ein}}$) und austretenden ($\dot{Q}_{\text{abs,aus}}$) Wärmestrom bestimmt werden kann.

Abbildung 6.18a veranschaulicht die entsprechenden berechneten Wärmestromdichten ($\dot{q}_{\text{abs,ein}}$ und $\dot{q}_{\text{abs,aus}}$) während der achtstündigen Bestrahlung für die vier untersuchten Einstrahlwinkel (φ). Hierbei zeigt sich, dass, ausgehend vom stationären Ausgangszustand (Wärmeverlust), eine Umkehr der Richtung des Wärmestroms (negativ nach positiv) erfolgt, wodurch eine Energieeinspeicherung in die Absorber-Klebeschicht bzw. in das Vollziegelmauerwerk erzielt wird. Die größte Änderung der Wärmestromdichten erfolgt innerhalb der ersten Stunde nach Bestrahlungsbeginn. Anschließend stellen sich für die ein- und austretende Wärmestromdichte nahezu konstante Werte von $90 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (19°), $60 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (24°), $30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (30°) und $13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (50°) ein.

Die in Abbildung 6.18b dargestellte Differenz zwischen der ein- und austretenden Wärmestromdichte entspricht der zeitlichen Änderung der flächenspezifischen inneren Energie

($\frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$) und nimmt mit steigendem Einstrahlwinkel bzw. zunehmender Bestrahlungsdauer ab. Aufgrund der Proportionalität zwischen der Temperaturerhöhungsrates und dieser Differenz sind die Kurvenverläufe (vgl. Abbildungen 5.7 (TRR) bzw. 6.18b ($\frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$)) über die Proportionalitätskonstante $\frac{mc_p}{A}$ nach Gleichung (5.12) ineinander umrechenbar, wodurch aus der gemessenen TRR die zeitliche Änderung der inneren Energie der Absorberschicht bestimmt werden kann.



(a) Simulierte ein- ($\dot{q}_{abs,ein}$) und austretende ($\dot{q}_{abs,aus}$) Wärmestromdichte der Absorberschicht während der achtstündigen Bestrahlung für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ). (b) Simulierte flächenspezifische zeitliche Änderung der inneren Energie ($\frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$) innerhalb der ersten Stunde nach Bestrahlungsbeginn für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Abbildung 6.18: Simulierte ein- ($\dot{q}_{abs,ein}$) und austretende ($\dot{q}_{abs,aus}$) Wärmestromdichte der Absorberschicht sowie flächenspezifische zeitliche Änderung der inneren Energie ($\frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$) für vier verschiedene Einstrahlwinkel (φ).

Wärmetransport WK4 - Temperaturverlauf in der Wandkonstruktion und solare Wärmeeindringtiefe

Kurz vor dem Bestrahlungsbeginn durch den Solarsimulator liegt in der Wandkonstruktion WK4 ein nach außen gerichteter Wärmestrom vor, da die Temperatur von der Wandinnenseite zur -außenseite kontinuierlich abnimmt. Durch die Bestrahlung steigt die Temperatur in der Absorberschicht und im solarselektiven Wärmedämmsystem an, woraus sich ein Wärmestrom vom Absorber in das Vollziegelmauerwerk einstellt, der dem Wärmeverlust von der Wandinnenseite entgegenwirkt. Anhand dieser Überlegungen kann geschlussfolgert werden, dass im Vollziegelmauerwerk eine Positionscoordinate z_E existiert, mit der die zeitabhängige Eindringtiefe der Solarstrahlung (solare Wärmeeindringtiefe) definiert werden kann [148].

Die Abbildungen 6.19a und 6.19c zeigen die simulierte flächengemittelte Temperatur

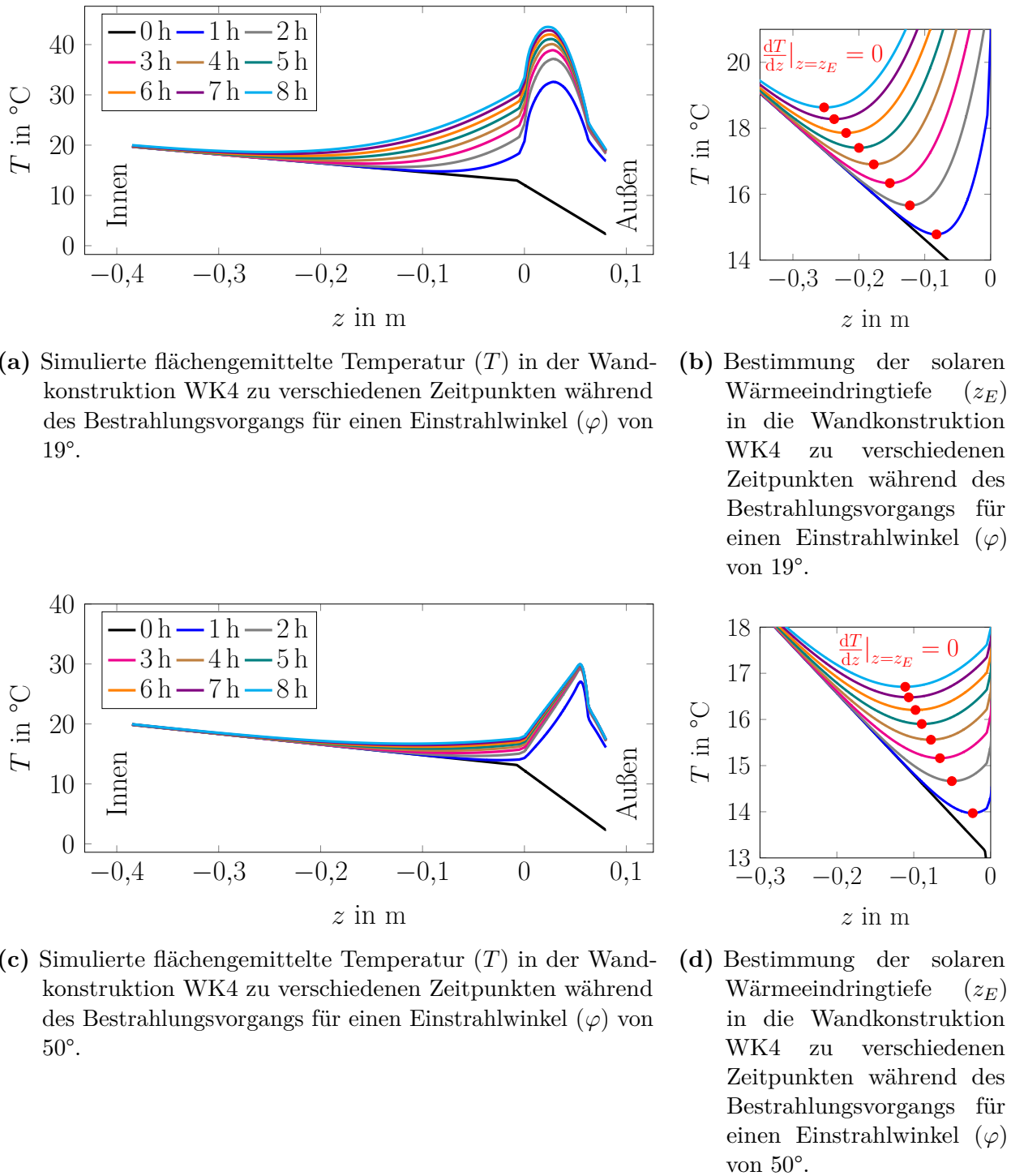


Abbildung 6.19: Simulierte flächengemittelte Temperatur (T) und solare Wärmeeindringtiefe (z_E) in der Wandkonstruktion WK4 zu verschiedenen Zeitpunkten während des Bestrahlungsvorgangs für Einstrahlwinkel (φ) von 19° und 50° .

in der Wandkonstruktion WK4 von der Wandinnenseite (links) zur -außenseite (rechts) zu verschiedenen Zeitpunkten während des achtstündigen Bestrahlungsvorgangs für die

Einstrahlwinkel von 19° und 50° . Hierbei zeigt sich, dass während der Bestrahlung für beide Einstrahlwinkel die höchsten Temperaturen im solarselektiven Wärmedämmsystem auftreten, da aufgrund der eingeschlossenen Luftkapillare und dem MHGK-Wärmedämmputz nur eine sehr geringe Wärmespeicherfähigkeit vorhanden ist. Bei 19° ergeben sich, ausgehend vom Absorber ($z = 0$ m) bis zur Wandinnenseite, mit zunehmender Bestrahlungsdauer deutlich höhere Temperaturen, da eine höhere Wärmestromdichte vorhanden ist (vgl. Abbildung 6.18a).

Zur Ermittlung der zeitabhängigen solaren Wärmeeindringtiefe (z_E) werden die Minima der Temperaturverläufe in den Abbildungen 6.19b und 6.19d bestimmt ($\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=z_E} = 0$), die den zeitabhängigen Umkehrpunkt des Wärmestroms definieren [148]. Abbildung 6.20 veranschaulicht für die entsprechenden Zeitpunkte die Wärmeeindringtiefe während des Bestrahlungsvorgangs bei den Einstrahlwinkeln von 19° und 50° . Hierbei zeigt sich ein deutlich geringerer Anstieg von z_E bei 50° gegenüber 19° . Somit ergeben sich nach 8 h maximale solare Wärmeeindringtiefen von 253 mm (19°) und 111 mm (50°).

Aufgrund der gleichbleibenden Masse und spezifischen Wärmekapazität der Speichermasse wird, wie in Abbildung 6.20 veranschaulicht, die volumengemittelte Temperatur im Mauerwerk (T_V) entsprechend Gleichung (6.26) zur Quantifizierung der Energieeinspeicherung verwendet.

$$T_V = \frac{1}{V} \iiint_V T dV \quad (6.26)$$

Zu Beginn des Bestrahlungsversuchs beträgt T_V für die Einstrahlwinkel von 19° und 50° $16,26^\circ\text{C}$ bzw. $16,43^\circ\text{C}$. Nach 8 h durchgängiger Bestrahlung ergeben sich die volumengemittelten Temperaturen zu $21,38^\circ\text{C}$ (19°) bzw. $17,68^\circ\text{C}$ (50°). Werden die jeweiligen Änderungen von T_V über den Bestrahlungszeitraum zueinander ins Verhältnis gesetzt, kann festgestellt werden, dass die ins Mauerwerk eingespeicherte Energie bei 50° nur $1,25\text{ K}/5,12\text{ K}=24,4\%$ von der bei 19° beträgt.

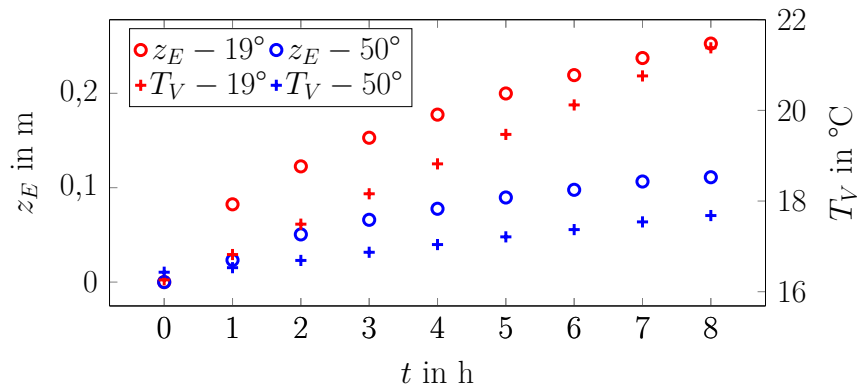


Abbildung 6.20: Solare Wärmeeindringtiefe (z_E) und volumengemittelte Temperatur der Speichermasse (T_V) während des achtstündigen Bestrahlungsvorgangs für die Einstrahlwinkel (φ) von 19° und 50° .

6.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel umfasst, abhängig von der Komplexität der Wandkonstruktion sowie dem zu berücksichtigenden, physikalischen Phänomen, die sukzessive Entwicklung von Simulationsmodellen auf verschiedenen Detaillierungsebenen. Für die ungedämmte Wandkonstruktion WK1 wurden sowohl ein dynamisches 1D- als auch ein dynamisches 3D-Modell entwickelt, durch die die experimentell ermittelten Leistungskenngrößen „Solarer Gewinn“ (SG) und „Wärmeverlustreduktionsfaktor“ (HLRF) gut wiedergegeben werden konnten. Trotz des nahezu eindimensionalen Wärmestroms zeigte sich, dass mittels des 3D-Modells von WK1 verbesserte Übereinstimmungen, ausgedrückt durch geringere relative Abweichungen von $-3,1\%$ (SG) bzw. $-4,3\%$ (HLRF) in Bezug auf das Experiment, erzielt werden konnten. Die Auswirkungen der MHGK-Dämmschicht von WK2 auf den dynamischen Wärmetransport im Vollziegelmauerwerk und zur Wandinnenseite wurden mittels eines Simulationsmodells ermittelt und mit den experimentellen Versuchsergebnissen aus Kapitel 5 verglichen. Hierbei zeigte sich, dass das numerische Modell die Temperaturerhöhung in der Absorberschicht (TR) und den wandinnenseitigen dimensionslosen Wärmestrom (DLHF) über den gesamten Untersuchungszeitraum von 55,5 h mit geringen Abweichungen von lediglich $\Delta \overline{\text{TR}}_0^{55,5} = 0,1\text{ K}$ bzw. $\Delta \overline{\text{DLHF}}_0^{55,5} = 1,4\%$ sehr gut wiedergibt.

Das sich in beträchtlicher Weise von den herkömmlichen Wandaufbauten unterscheidende solar selektive Wärmedämmsystem wurde in einem stationären und einem transienten Modell untersucht. Hierbei wurden die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) des solar selektiven Wärmedämmsystems in verschiedenen Herstellungsstadien und der winkelabhängige Gesamtenergiedurchlassgrad (g) sehr gut durch das stationäre Modell wiedergegeben. In Stadium 2 (gebohrte Platte ohne Glaszylinder) ergab sich eine mittlere experimentelle bzw. berechnete λ_{eff} von $49 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}/48,5 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$, in Stadium 3 (gebohrte Platte mit Glaszylinder) wurden die effektiven Wärmeleitfähigkeiten zu $57 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}/56,1 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$ bestimmt. Da dieser Wert noch höher ist, als die Wärmeleitfähigkeit des reinen MHGK-Dämmputzes in Stadium 1 ($\lambda_{\text{eff}} = 45 \frac{\text{mW}}{\text{mK}}$), werden in Kapitel 7, anhand einer Parameterstudie zum konstruktiven Aufbau, Empfehlungen zur Verbesserung der thermischen Dämmwirkung des solar selektiven Wärmedämmsystems gegeben.

Zur Simulation des Strahlungstransports innerhalb des lichtleitenden Elements von WK4 wurde, aufgrund der Komplexität der Interaktion der Lichtstrahlen mit dem Glaskörper und den Kapillärwänden, abweichend von der herkömmlichen Vorgehensweise mittels eines Wandwärmestromterms (WK1 und WK2), eine Ray Tracing-Methode verwendet. Hierbei wurden im transienten Modell detaillierte Untersuchungen zur Strahlungsverteilung innerhalb des lichtleitenden Elements für verschiedene, im Prüfstand untersuchte Einstrahlwinkel durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei 19° ca. 27 % der einfallenden Strahlung direkt von der Absorber-Klebeschicht aufgenommen werden. Für 50° werden 97 % der Strahlung unmit-

telbar von den Oberflächen nahe des Verschlusselements absorbiert, wodurch, im Vergleich zu anderen transparenten Wärmedämmmaterialien (vgl. Abbildung 2.8), ausschließlich eine auf einen geringen Winkelbereich beschränkte Strahlungsleitung zum Absorber erfolgt. Die ermittelten Strahlungsverteilungen für 19° , 24° , 30° und 50° wurden anschließend, zur thermischen Simulation der winkelabhängigen Bestrahlungsversuche (Kapitel 5), im transienten Modell verwendet. Hierbei konnten sehr gute Übereinstimmungen für die Temperaturerhöhung in der Absorberschicht sowie die Wärmestromdichte bzw. Oberflächentemperatur auf der Wandinnenseite erzielt werden, was sich in entsprechend geringen Unterschieden der absoluten mittleren und absoluten maximalen Abweichung über einen definierten Zeitraum ($\Delta \bar{T}|_t^{t+\Delta t}$ und $\text{MAX}(|\Delta T|)_t^{t+\Delta t}$) widerspiegelte. Für eine Verbesserung der Validierung der experimentellen Ergebnisse bei hohen Einstrahlwinkeln, bei denen die Absorption der Solarstrahlung vornehmlich nahe des Verschlusselements auf der Wandaußenseite stattfindet, wird empfohlen, derartige Untersuchungen auf ein großskaliges Modell auszuweiten. Hierdurch können sowohl die Interaktionen der lichtleitenden Elemente untereinander als auch Randeffekte simuliert werden.

Anhand des validierten Modells von WK4 wurden Untersuchungen zur energetischen Bilanzierung der Absorberschicht, zum Temperaturverlauf in der Wandkonstruktion und zur solaren Wärmeeindringtiefe durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die aus der Absorberschicht austretende und ins Vollziegelmauerwerk eintretende Wärmestromdichte bei 19° deutlich größer ist als bei 50° ($90 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ vs. $13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). Die hieraus resultierenden deutlich höheren Temperaturen im Vollziegelmauerwerk führten zu einer solaren Wärmeeindringtiefe von 253 mm bei 19° , während die Eindringtiefe bei 50° lediglich 111 mm betrug. Die während der Bestrahlung ins Massivmauerwerk eingespeicherte Energie beträgt bei 50° lediglich 24,4 % der Energie bei 19° .

7 Parameterstudie und Jahressimulation zum solarselektiven Wärmedämmsystem

Das vorliegende Kapitel behandelt die numerische Untersuchung des konstruktiven Aufbaus des solarselektiven Wärmedämmsystems anhand des in Abschnitt 6.2.1.2 vorgestellten stationären Modells im Stadium 3 (vgl. Abbildung 6.3b) [167]. Zudem wird das neu entwickelte Dämmsystem in einer Jahressimulation mit einer herkömmlich gedämmten Wandkonstruktion hinsichtlich des Energieeinsparpotentials verglichen [167].

7.1 Zielsetzung

Das Ziel bei der Entwicklung eines Dämmsystems ist das Erreichen optimaler technischer Eigenschaften. Für gewöhnliche Dämmsysteme ist die Wärmeleitfähigkeit des Materials die wesentliche bauphysikalische Kenngröße, da mittels einer definierten Schichtstärke der thermische Widerstand der Wandkonstruktion festgesetzt werden kann. Beim solarselektiven Wärmedämmsystem hingegen muss, neben der Dämmwirkung, auch dessen winkelabhängiges Verhalten hinsichtlich der solaren Gewinne berücksichtigt werden. Eine optimale Konstruktion des solarselektiven Wärmedämmsystems sieht vor, dass sowohl der thermische Widerstand als auch der solare Gewinn für geringe Einstrahlwinkel maximiert und der Wärmeeintrag bei hohen Sonnenständen minimiert wird. Um dies zu erreichen, wird eine Sensitivitätsanalyse zum konstruktiven Aufbau des solarselektiven Wärmedämmsystems durchgeführt, um die wesentlichen Einflussgrößen auf die oben genannten Zielgrößen zu identifizieren [167].

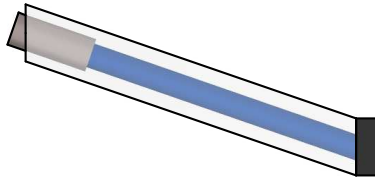
Darüber hinaus soll ein Vergleich der solarselektiven Wandkonstruktion mit einem gewöhnlichen Wandaufbau hinsichtlich des jährlichen solaren Mehrertrags durchgeführt werden. Hierzu wird für zwei Varianten des solarselektiven Wärmedämmsystems, die unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Parameterstudie definiert wurden, sowie für das herkömmliche Dämmmaterial eine Jahressimulation mit einem realen Wetterdatensatz durchgeführt. Um die erzielten solaren Gewinne des entwickelten Dämmsystems in vereinfachter Weise in gängigen eindimensionalen Gebäudesimulationstools verwenden zu können, wird zudem ein alternatives Berechnungskonzept auf Basis eines konstruktionsspezifischen Kennfelds vorgestellt [167].

7.2 Methodik

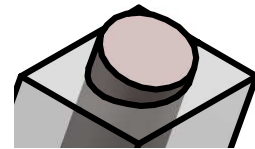
In den nachfolgenden Abschnitten wird die Methodik zur Sensitivitätsanalyse sowie zur jährlichen Untersuchung des Energieeinsparpotentials erläutert.

7.2.1 Parameterstudie zum konstruktiven Aufbau

Das in Abschnitt 6.2.1.2 ausführlich vorgestellte und in Abschnitt 6.3.3 validierte stationäre Modell des solarselektiven Wärmedämmsystems, welches in den Abbildungen 7.1a bzw. 7.1b in Seiten- und isometrischer Ansicht dargestellt ist, dient als Ausgangspunkt für die Parameterstudie zum konstruktiven Aufbau. Zur Bewertung des Einflusses der Konstruktion auf den solaren Gewinn bzw. das Dämmvermögen wird auf den bereits in Abschnitt 5.2.1 eingeführten Gesamtenergiedurchlassgrad (g) und die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) zurückgegriffen, welche für jede Konstruktionsvariante bestimmt werden.



(a) Seitenansicht des stationären Modells des solarselektiven Wärmedämmsystems.



(b) Isometrische Ansicht der Wandaußenseite des stationären Modells der solarselektiven Wandkonstruktion.

Abbildung 7.1: Referenzmodell als Ausgangszustand zur Verbesserung des solarselektiven Wärmedämmsystems.

Mögliche, zu variierende Konstruktionsparameter sind in nachfolgender Aufzählung angeführt:

- Verschlusselement: Länge (1), Wärmeleitfähigkeit und Form (2)
- Absorber: Kurzwelliger Absorptionsgrad (3) und Wärmeleitfähigkeit
- Vorderer und hinterer Durchmesser der Stufenbohrung (4)
- Anstellwinkel der Bohrungssachse zur Horizontalen (Polarwinkel)
- Abweichung der Bohrungssachse in Ost-West-Richtung (Azimut)
- Flächenanteil der lichtleitenden Elemente an der Wandaußenseite (5)
- Gesamtschichtstärke des Dämmsystems und Grundmaterial

Die vorliegende numerische Sensitivitätsanalyse konzentriert sich auf die Untersuchung der Konstruktionsmerkmale (1) bis (5), da diese nur zu einer geringen konstruktiven Abänderung des ursprünglichen Systems führen. Das Referenzmodell aus den Abbildungen 7.1a bzw. 7.1b weist für die Konstruktionsmerkmale (1) bis (5) folgende Eigenschaften auf: Länge des Verschlusselements: 20 mm; Form des Verschlusselements: Vollzylinder; Kurzwelliger Absorptionsgrad des Absorbers: 89,5 %; Vorderer und hinterer Durchmesser der Stufenbohrung: 8 mm/6 mm; Flächenanteil des lichtleitenden Elements an der Wandaußenseite: 26,4 %. Die folgenden Abschnitte stellen detailliert die vorgenommenen Änderungen am ursprünglichen konstruktiven Aufbau vor.

7.2.1.1 Länge und Form des Verschlusselements

Die ersten beiden zu untersuchenden Parameter betreffen das von außen in das Dämmsystem eingebrachte Verschlusselement, welches im Prototyp des solarselektiven Wärmedämmsystems als Vollzylinder, bestehend aus Borosilikatglas, mit einer Länge von 20 mm ausgeführt ist. Nachteil dieses transparenten Verschlusselements ist die bereits in Abschnitt 6.3.3 gezeigte Wirkung als Wärmebrücke. Die Wärmeleitfähigkeit des Glaskörpers ($1,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [145]) ist deutlich höher als die des MHGK-Wärmedämmputzes bzw. der Luft, wodurch der gesamte thermische Widerstand der Dämmschicht gesenkt wird. Ausgehend von den experimentell ermittelten bzw. berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeiten aus Abschnitt 6.3.3 muss das Dämmvermögen erhöht werden, um einen ähnlichen thermischen Widerstand im Vergleich zum Grundmaterial zu erzielen. Aus diesem Grund werden Untersuchungen zum Wärme- und Strahlungstransport für Zylinderlängen von 10 mm (vgl. Abbildung 7.2a) bzw. 5 mm (vgl. Abbildung 7.2b) vorgenommen. Darüber hinaus soll auch die Auswirkung der Form des Verschlusselements numerisch untersucht werden, wobei der zylindrische Charakter beibehalten werden soll. Daher wird, als Alternative zum Vollzylinder (vgl. Abbildung 7.2c), eine Untersuchung unter Verwendung eines Hohlzylinders mit einer Wandstärke von 1 mm (vgl. Abbildung 7.2d) durchgeführt.

7.2.1.2 Kurzwelliger Absorptionsgrad des Absorbers

Der nächste zu variierende Parameter steht in Bezug zum Absorber, auf dem das solarselektive Wärmedämmsystem appliziert wird. Hierbei wurde, für die Untersuchung des solarselektiven Wärmedämmsystems, eine schwarz lackierte Eisenplatte verwendet bzw. dem Klebemörtel der solarselektiven Wandkonstruktion WK4, zur Erhöhung des kurzwelligen Absorptionsgrads, 5 wt% Eisenoxid-Partikel zugegeben. Der kurzwellige Absorptionsgrad wird zwischen 90 % und 60 % variiert, um die Notwendigkeit einer schwarzen Absorberfläche zu überprüfen.

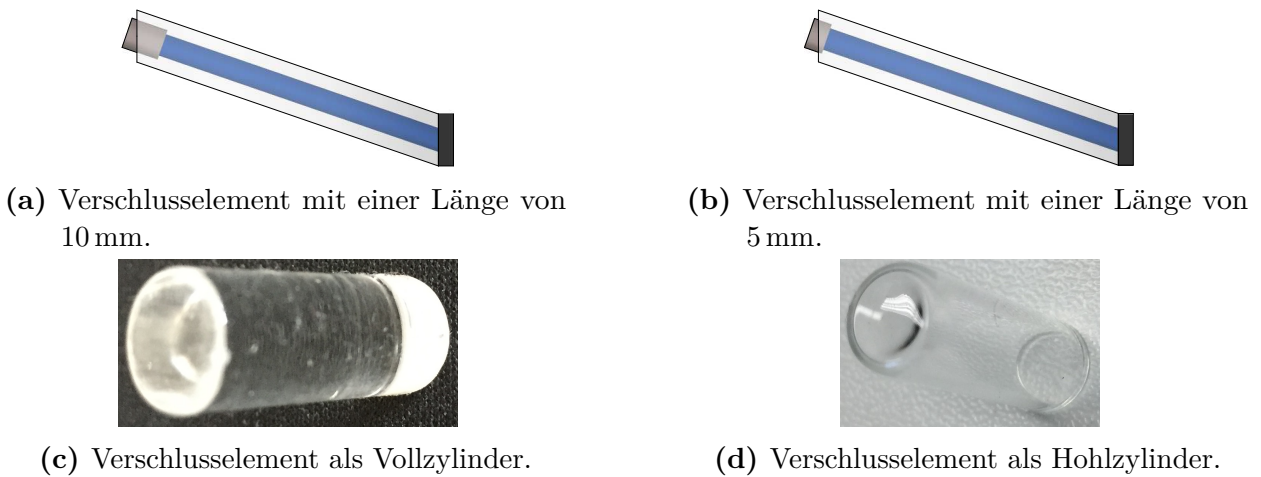


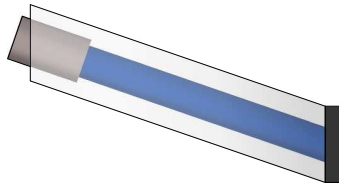
Abbildung 7.2: Variation der Länge und Form des Verschlusselements.

7.2.1.3 Durchmesser und Flächenanteil der lichtleitenden Elemente

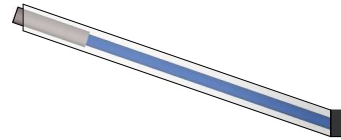
Bei den beiden letzten zu untersuchenden Größen handelt es sich um die Durchmesser und den Flächenanteil der lichtleitenden Elemente. Ausgehend vom Prototyp mit den Durchmessern 8 mm/6 mm wird eine Sensitivitätsanalyse mit 12 mm/9 mm (vgl. Abbildung 7.3a) sowie mit 4 mm/3 mm (vgl. Abbildung 7.3b) durchgeführt. Die Durchmesser wurden so gewählt, dass das Flächenverhältnis konstant bleibt ($12^2/9^2 = 8^2/6^2 = 4^2/3^2$), jedoch bei gleichbleibender Schichtstärke der Dämmung von $L = 80$ mm eine Variation des L/D -Verhältnisses erfolgt. Der Einfluss des Flächenanteils des lichtleitenden Elements an der Wandaußenseite wird, ausgehend vom Prototyp (26,4 %), für 34,9 % (vgl. Abbildung 7.3c) bzw. 50,3 % (vgl. Abbildung 7.3d) untersucht, um die Auswirkungen der zunehmenden lichtleitenden Querschnittsfläche auf die effektive Wärmeleitfähigkeit und den solaren Gewinn zu ermitteln.

7.2.2 Jährliche Untersuchung des Energieeinsparpotentials

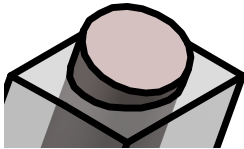
In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Modelle, der Berechnungsalgorithmus, die Klimadaten, der Auswertzeitraum der Berechnungen sowie die quantitativen Vergleichskenngrößen für die Ermittlung der jährlichen Energieeinsparungen des solarselektiven Wärmedämmsystems gegenüber einer herkömmlich gedämmten Wandkonstruktion dargestellt. Weiterhin wird eine Methodik zur vereinfachten Berücksichtigung der solaren Gewinne innerhalb der lichtleitenden Elemente bei der jährlichen Untersuchung vorgestellt.



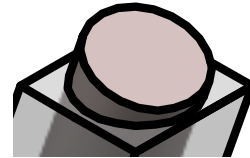
(a) Durchmesser des lichtleitenden Elements von 12 mm und 9 mm.



(b) Durchmesser des lichtleitenden Elements von 4 mm und 3 mm.



(c) Flächenanteil des lichtleitenden Elements an der Wandaußenseite von 34,9 %.



(d) Flächenanteil des lichtleitenden Elements an der Wandaußenseite von 50,3 %.

Abbildung 7.3: Variation der Durchmesser und des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente.

7.2.2.1 Simulationsmodelle für die jährliche Bilanzierung des Energieeinsparpotentials

Die Bewertung der tatsächlichen Energieeinsparung des solarselektiven Wärmedämmsystems gegenüber einem herkömmlichen Dämmaufbau mit MHGK-Dämmputz erfolgt auf Basis der validierten transienten Modelle, deren mathematische Modellierung, Materialeigenschaften und Randbedingungen ausführlich in Kapitel 6 vorgestellt wurden. Die Gemeinsamkeit der untersuchten Modelle ist, dass die südorientierten Wandkonstruktionen, die in den Abbildungen 7.4a, 7.4b und 7.4c visualisiert sind, den gleichen Grundaufbau, bestehend aus Innenputz (1,5 cm), Vollziegelmauerwerk (36,5 cm) und Haftputz/Absorber (0,5 cm), besitzen. Die Variante „Solarselektiv #1“ weist, bis auf den kürzeren Glaskörper (10 mm statt 20 mm), identische Eigenschaften zum hergestellten Prototyp aus Abschnitt 3.3.5 auf. „Solarselektiv #2“ stellt eine unter Berücksichtigung der Konstruktionsmerkmale aus Abschnitt 7.2.1 angepasste Variante dar.

Tabelle 7.1 listet die wesentlichen Merkmale der untersuchten Wandkonstruktionen auf. Mit den effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Dämmschichten ($\lambda_{\text{eff,Dämmung}}$) aus Tabelle 7.1 ergeben sich die U -Werte der solarselektiven Dämmschichten #1 und #2 zu $0,553 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bzw. $0,602 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Der in Abschnitt 2.4 gesetzte Zielwert von $0,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ kann somit mit beiden Varianten erreicht werden.

Grundsätzlich sind für die solarselektiven Wandkonstruktionen die Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung (WL) und langwellige Wärmestrahlung (WS) innerhalb der Kapillare bei der Berechnung des stationären U -Werts des Gesamtwandaufbaus bzw. der Transmissionswärmeverluste von Bedeutung (vgl. Abschnitt 6.2.1.2). Allerdings resultiert die Miteinbeziehung der Wärmestrahlung im transienten numerischen Modell, im Vergleich zur

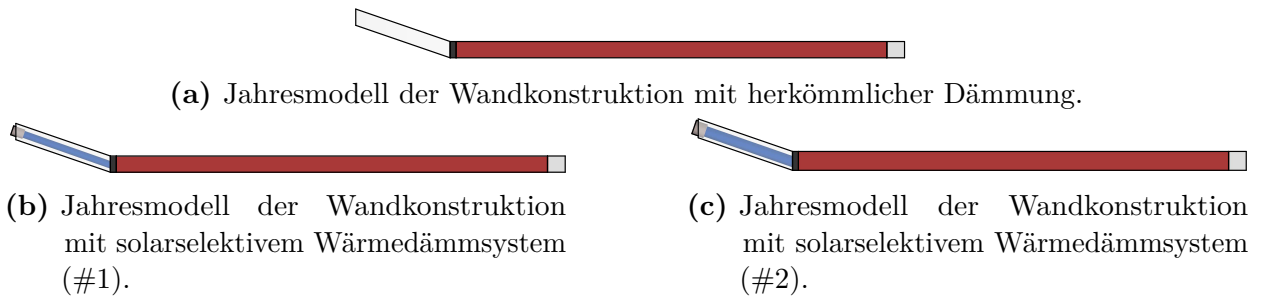


Abbildung 7.4: Verwendete Simulationsmodelle für die Untersuchung des jährlichen Energieeinsparpotentials.

alleinigen Berechnung der Wärmeleitung, in einer unverhältnismäßig längeren Berechnungszeit. Die Berechnungen wurden daher ausschließlich unter Berücksichtigung der Wärmeleitung durchgeführt. Um dennoch die tatsächlichen, aufgrund der Wärmestrahlung in der Kapillare höheren Wärmeverluste (q_{WL+WS}) bei der Bilanzierung zu berücksichtigen, werden die ermittelten jährlichen Energieverluste (q_{WL}) mit dem Verhältnis der U -Werte (U_{WL+WS}/U_{WS} , vgl. Tabelle 7.1) entsprechend Gleichung (7.1) skaliert.

$$q_{WL+WS} = q_{WL} \frac{U_{WL+WS}}{U_{WL}} \quad (7.1)$$

Zur Ermittlung der U -Werte wurden die Normwärmeübergangskoeffizienten [168] auf der Wandinnen- und Wandaußenseite von $7,69 \frac{W}{m^2 K}$ bzw. $25 \frac{W}{m^2 K}$ verwendet. Gegenüber den numerischen Untersuchungen zur Validierung des kleinskaligen Modells aus Abschnitt 6.2.1.2 muss zudem für alle Modelle die geringere Parallelitätsabweichung der Lichtstrahlen der Sonne²⁶ gegenüber der des Solarsimulators ($\pm 2^\circ$) berücksichtigt werden.

Tabelle 7.1: Wesentliche bauphysikalische und konstruktive Eigenschaften der Jahressimulationsmodelle aus Abbildung 7.4.

Modell	d_1/d_2 in mm/mm	A_{LCE} in %	L_{Glas} in mm	$\lambda_{eff,Dämmung}$ in $\frac{mW}{m K}$	U_{WL+WS}/U_{WL} in $\frac{W}{m^2 K}$
Herkömmlich	-	-	-	45,0	-/0,399
Solarselektiv #1	8/6	26,4	10	48,9	0,424/0,396
Solarselektiv #2	12/9	44,2	10	53,7	0,452/0,382

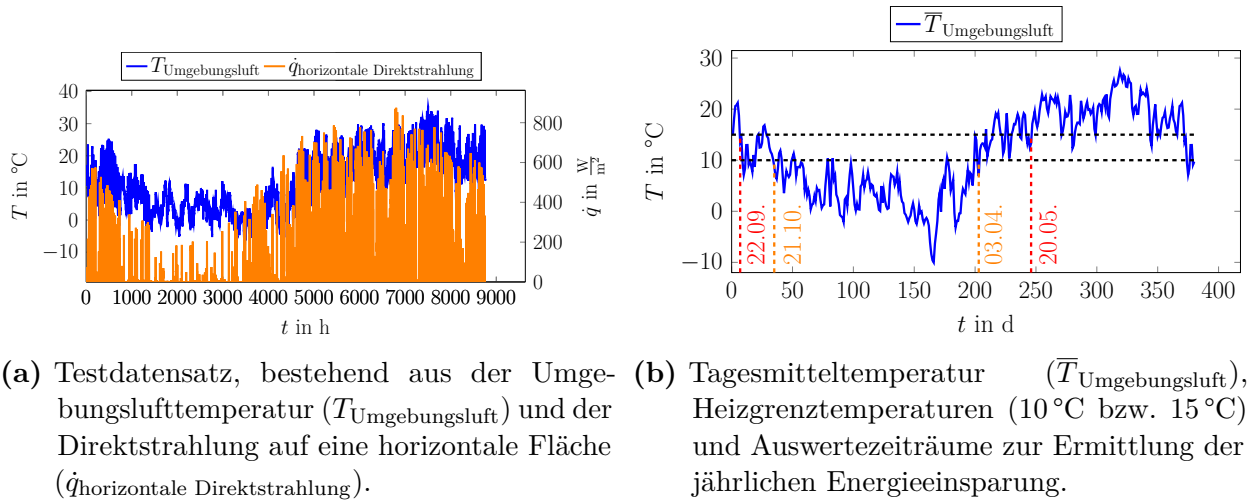
7.2.2.2 Klimadaten, Auswertezeitraum und quantitative Jahresvergleichskenngößen

Als Randbedingung auf der Wandaußenseite der in Abschnitt 7.2.2.1 beschriebenen Modelle wird der in Abbildung 7.5a dargestellte Testdatensatz verwendet. Dieser besteht aus der Lufttemperatur ($T_{Umgebungsluft}$) sowie der Direktstrahlung senkrecht zur Einfallrichtung

²⁶Parallelitätsabweichung der einfallenden Lichtstrahlen bei einer Distanz zwischen Sonne und Erde von $149,6 \times 10^6$ km und einem Sonnenradius von $0,696 \times 10^6$ km: $\pm \arctan(0,696/149,6) = \pm 0,2666^\circ$.

(abgeleitet aus der Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche ($\dot{q}_{\text{horizontale Direktstrahlung}}$)). Es handelt sich hierbei um stündliche Klimadaten des Standorts Nürnberg (Stations-Id: 03668) aus dem Jahr 2018 [169]. Der Testdatensatz beginnt am 16.09.2018 ($t = 0$ h) und wird beim Jahreswechsel im Januar desselben Jahres fortgesetzt. Auf der Wandinnenseite wird bei allen Modellen eine ganzjährige Lufttemperatur von 21 °C angesetzt, sodass sowohl die winterlichen Energiegewinne als auch die sommerlichen Überhitzungseffekte unmittelbar zwischen den Wandkonstruktionen verglichen werden können.

Abbildung 7.5b zeigt die Tagesmitteltemperatur ($\bar{T}_{\text{Umgebungsluft}}$) des Testdatensatzes sowie die Heizgrenztemperaturen von 10 °C bzw. 15 °C [170], die für die Auswertung der winterlichen Energieeinsparung herangezogen werden. Hieraus ergeben sich die in Abbildung 7.5b angegebenen Zeiträume vom 22.09. bis 20.05. bzw. 21.10. bis 03.04., in denen die Simulationsmodelle verglichen werden.



(a) Testdatensatz, bestehend aus der Umgebungslufttemperatur ($T_{\text{Umgebungsluft}}$) und der Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche ($\dot{q}_{\text{horizontale Direktstrahlung}}$). (b) Tagesmitteltemperatur ($\bar{T}_{\text{Umgebungsluft}}$), Heizgrenztemperaturen (10 °C bzw. 15 °C) und Auswertez zeiträume zur Ermittlung der jährlichen Energieeinsparung.

Abbildung 7.5: Testdatensatz, Tagesmitteltemperatur und Auswertez zeitraum zur Untersuchung der Energieeinsparung durch die lichtleitenden Elemente.

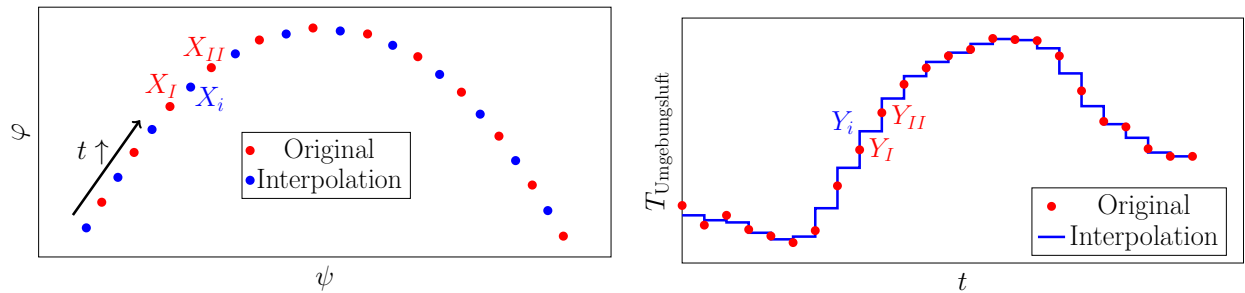
Bei der für die Bewertung der tatsächlichen Energieeinsparung notwendigen physikalischen Größe handelt es sich um die Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$). Das bedeutet, die Innenwand stellt die Bilanzgrenze der vorliegenden Untersuchungen dar. Ziel in der Heizperiode ist es, den Wärmestrom (Innenluft - Innenwand), der aus dem Innenraum abgegeben wird und somit über andere Wege (z. B. Radiatoren) zur Aufrechterhaltung einer konstanten Innenlufttemperatur von 21 °C zugeführt werden muss, zu minimieren. Dies soll durch die von außen nach innen geleitete Solarenergie erfolgen, die die Oberflächentemperatur auf der Wandinnenseite erhöht und somit den zusätzlichen Heizbedarf reduziert. Gleichung (7.2) definiert die flächenspezifische Wärmemenge auf der Wandinnenseite ($q_{\text{IS}}^{t_1 \rightarrow t_2}$) im betrachteten Zeitraum (t_1 bis t_2) als integrale Vergleichskenngröße zwischen den verschiedenen

Simulationsmodellen aus Abbildung 7.4.

$$q_{IS}^{t_1 \rightarrow t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{q}_{IS} dt \quad (7.2)$$

7.2.2.3 Berechnungsalgorithmus

Die bisher gekoppelt durchgeführte Berechnung des Wärme- und kurzwelligen Strahlungs- transports im stationären bzw. transienten Modell aus Abschnitt 6.2.1.2 beschränkte sich auf eine einmalige Berechnung der Strahlungsverteilung mittels Ray Tracing, die anschließend in der thermischen Simulation als konstant betrachtet wurde. Durch die im Gegensatz zum Solar- simulator zeitlich variierende Sonnenposition, müsste die aufwändige Ray Tracing-Simulation nach einem infinitesimal kleinen Zeitschritt, unter Berücksichtigung der momentanen Strah- lungsintensität senkrecht zur Einfallrichtung ($I_{S,\perp}(t)$), dem Polarwinkel ($\varphi(t)$) und dem Azimut ($\psi(t)$) erneut durchgeführt werden. Um den numerischen Berechnungsaufwand bei der Jahressimulation zu reduzieren, wird je Zeitstunde nur eine mittlere Strahlungsverteilung aus einer linearen Interpolation der zu Beginn und am Ende vorliegenden Sonnenposition und der zugehörigen Solarstrahlungsintensität ermittelt, was beispielhaft in Abbildung 7.6a dargestellt ist. Hierbei wird die Strahlungsverteilung auf der Wandaußenseite bzw. im lichtleitenden Element aus der mittleren gemessenen Strahlungsintensität im Zeitraum von X_I bis X_{II} sowie dem Polarwinkel (φ) und Azimut (ψ) von X_i berechnet. Ein ähnliches Verfahren wird für die Außenlufttemperatur ($T_{\text{Umgebungsluft}}$) angewandt, die in Abbildung 7.6b dargestellt ist, wobei hier die Zustände mit Y_I , Y_{II} und Y_i bezeichnet sind.



(a) Originale Messpunkte und die für die Ray Tracing-Simulation interpolierte Sonnenposition (Polarwinkel (φ) und Azimut (ψ)). (b) Originale Messpunkte und die für die thermische Simulation interpolierte Außenlufttemperatur ($T_{\text{Umgebungsluft}}$).

Abbildung 7.6: Interpolationsverfahren für die Sonnenposition und die Außenlufttemperatur in den Jahressimulationen.

Zur Umsetzung des oben beschriebenen Verfahrens wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher eine Kopplung von MATLAB® und COMSOL Multiphysics® vorsieht und in Form eines Flussdiagramms in Abbildung 7.7 veranschaulicht ist. In dem vorgestellten Verfahren werden die Umweltrandbedingungen stündlich geändert ($t_{i+1} - t_i = 1 \text{ h}$). Mittels der interpolierten

Wetterdaten (1.) wird zunächst die erstmalige, stationäre Ausgangstemperaturverteilung in der Wandkonstruktion ermittelt (2. und 3.). Anschließend erfolgt eine Übergabe dieser Temperaturverteilung an die dynamische Wärmetransportberechnung (4.). Dabei wird zusätzlich die für den kommenden Zeitraum ($t_{i \rightarrow i+1}$) benötigte Strahlungsverteilung mittels Ray Tracing ermittelt (5. und 6.) und als Randwärmestrom ($\dot{q}_b(x, y, z, t_{i \rightarrow i+1})$, vgl. Gleichung (6.14)) ebenfalls in die dynamische Simulation integriert (7.). Nun wird die dynamische Temperaturverteilung zwischen den Zeitpunkten t_i und t_{i+1} (Zeitraum 1 h) ermittelt (8.), die als neue Ausgangstemperaturverteilung (9.) dient und in die transiente Wärmetransportsimulation einfließt (10.). Anschließend wird der Algorithmus mit der erneuten Berechnung der Strahlungsverteilung (5.) fortgesetzt.

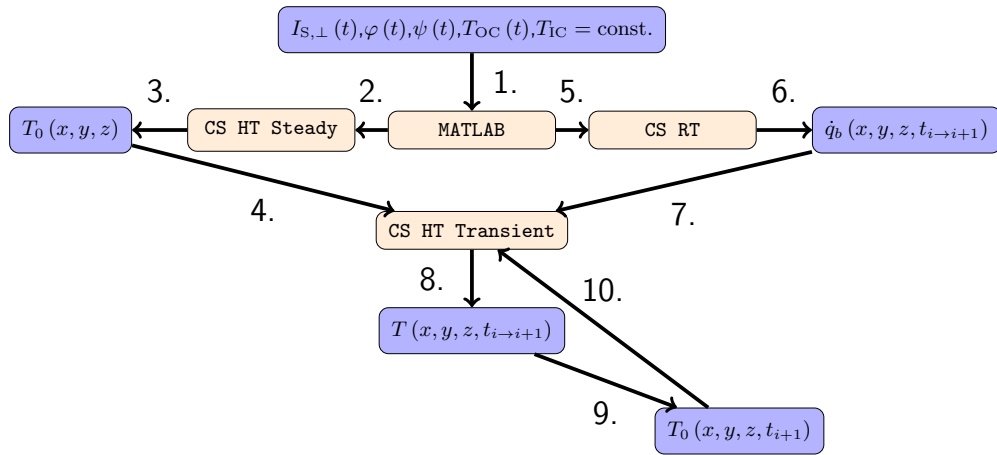


Abbildung 7.7: Flussdiagramm zur Kopplung des Wärme- und Solarstrahlungstransports bei der jährlichen Untersuchung der Wandkonstruktionen.

7.2.2.4 Vereinfachte Berechnungsmethodik

Der in Abschnitt 7.2.2.3 vorgestellte Berechnungsalgorithmus bestimmt für jede mittlere Sonnenposition die Strahlungsverteilung im lichtleitenden Element, die anschließend als Eingangsgröße für die dynamische Wärmetransportsimulation dient. Hierdurch ergibt sich ein immenser Berechnungsaufwand, der mittels einer alternativen Berechnungsmethodik auf Basis eines 1D-Simulationsmodells und eines für eine spezifische Konfiguration gültigen Kennfelds reduziert werden soll. Grundlage hierfür ist die eindimensionale transiente Wärmeleitungsdifferentialgleichung (6.2), die um eine von mehreren Größen abhängige Wärmequellendichte ($\dot{Q}_V$), entsprechend Gleichung (7.3), erweitert wird [167].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp}(t)) \quad (7.3)$$

Die Wärmequellendichte wird zur Berücksichtigung der im lichtleitenden Element auftretenden Wärmeströme im Dämmmaterial-Äquivalent, welches Effektivwerte für die Wär-

meleitfähigkeit (λ_{eff}), die Dichte (ρ_{eff}) und die spezifische Wärmekapazität ($c_{p,\text{eff}}$) aufweist, appliziert. Abbildung 7.8 veranschaulicht das lichtleitende Element des Simulationsmodells „Solarselektiv #1“ sowie die eindimensionale Repräsentation der Dämmschicht.

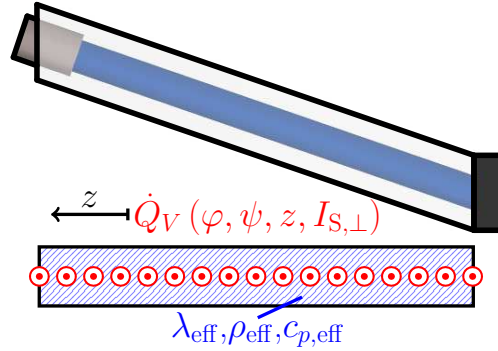


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung der eindimensionalen Modellierung der Strahlungsverteilung im lichtleitenden Element von „Solarselektiv #1“ über eine Wärmequellendichte ($\dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp}(t))$).

Zur Modellierung der Wärmequellendichte müssen die Abhängigkeiten von der Position innerhalb des lichtleitenden Elements (z), der Zeit und, daraus abgeleitet, der momentanen Sonnenposition ($\varphi(t)$ und $\psi(t)$) sowie der aktuellen, senkrecht zur Einfallsrichtung vorhandenen Strahlungsintensität ($I_{S,\perp}(t)$) berücksichtigt werden. Somit ergibt sich grundsätzlich eine Funktion von vier unabhängigen Größen, d. h. $\dot{Q}_V = \dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp}(t))$. Zur Bestimmung dieses funktionalen Zusammenhangs wird zunächst eine Reduktion der unabhängigen Variablen von vier auf drei vorgenommen. Um dies zu erreichen, muss, unter der Prämisse gleichbleibender Strahlungsverteilung innerhalb des lichtleitenden Elements, eine Skalierung (Multiplikation mit SF) mit der tatsächlichen Intensität ($I_{S,\perp}(t)$) gegenüber einem Referenzzustand ($I_{S,\perp,\text{ref}}$), entsprechend Gleichung (7.4), vorgenommen werden.

$$\dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp}(t)) = \underbrace{\frac{I_{S,\perp}(t)}{I_{S,\perp,\text{ref}}}}_{\text{SF}} \dot{Q}_V(\varphi(t), \psi(t), z, I_{S,\perp,\text{ref}}) \quad (7.4)$$

Hieraus kann für die Geometrie des solarselektiven Wärmedämmsystems die Strahlungsverteilung und, daraus abgeleitet, die Wärmequellendichte bestimmt werden. Dazu wird ein Kennfeld aus den drei unabhängigen Größen bei einer Referenzintensität von $I_{S,\perp,\text{ref}}$ (hier: $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) erstellt, welches mittels einer Ray Tracing-Simulation in Schrittweiten von $\Delta\varphi$, $\Delta\psi$ und Δz bestimmt wird. Oftmals stimmen die momentanen Einstrahlwinkel (φ und ψ) nicht mit den ermittelten Stützstellen überein, sodass eine Interpolation durchgeführt werden muss, deren Genauigkeit mit abnehmender Schrittweite des Kennfelds ($\Delta\varphi$, $\Delta\psi$ und Δz) erhöht wird. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass durch die steigende Anzahl an Stützstellen der Berechnungsaufwand durch die Ray Tracing-Simulation zunimmt.

7.3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudie bei einer Variation der in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Konstruktionsmerkmale und die jährliche energetische Bilanzierung des solarselektiven Wärmedämmsystems vorgestellt.

7.3.1 Parameterstudie

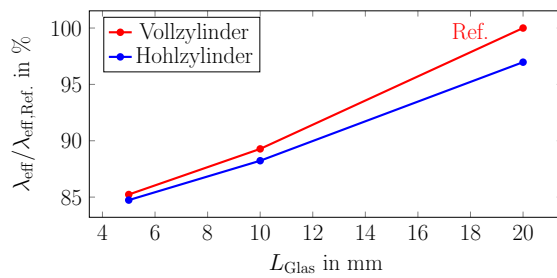
Der Einfluss der jeweiligen Konstruktionsparameter auf das solarselektive System muss anhand mehrerer Zielgrößen bewertet werden. Die übergeordneten Ziele sind hierbei eine Reduktion der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des sommerlichen Energieeintrags sowie die Maximierung der winterlichen Energieeinsparung. In den kommenden Abschnitten werden die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) sowie der bereits aus Abschnitt 5.3.1 bekannte Gesamtenergiedurchlassgrad (g) zum Vergleich herangezogen.

7.3.1.1 Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit

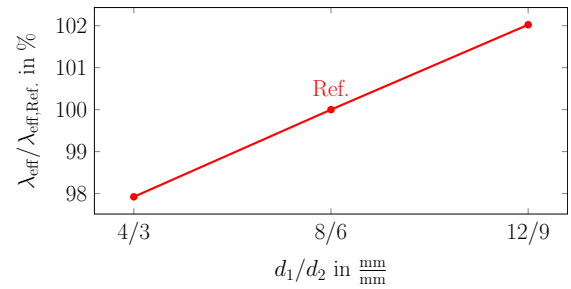
Die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) des Referenzmodells aus Abbildung 7.1 soll möglichst weit reduziert werden, um auch an sonnenlosen Tagen einen ausreichenden Wärmeschutz zu gewährleisten. Die Abbildungen 7.9a, 7.9b und 7.9c zeigen, ausgehend vom Referenzzustand (Ref.), die Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Länge (1) und der Form (2) des Verschlusselements, den beiden Durchmessern der Stufenbohrung (4) sowie dem Flächenanteil der lichtleitenden Elemente an der Wandaußenseite (5) (vgl. Aufzählung in Abschnitt 7.2.1).

Wie aus Abbildung 7.9a ersichtlich, führt eine Reduktion der Glaszylinderlänge (L_{Glas}), unabhängig von der Form, zu einer Abnahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Durch die Viertelung der Länge des Vollzylinders auf 5 mm kann der Referenzwert um $-14,8\%$ reduziert werden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass, durch die Verringerung der Eindringtiefe des Glaselements, der gesamte thermische Widerstand erhöht wird, da das sehr gut wärmeleitende Verschlusselement durch eine Kombination aus Luft und Wärmedämmputz, die beide deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, ersetzt wird. Die Verwendung eines Hohl- statt eines Vollzylinders zeigt insgesamt nur eine geringe Verbesserung, wobei die größte Reduktion von $-3,1\%$ bei der Referenzlänge von 20 mm auftritt. Auch bei einer Wandstärke des Hohlzylinders von nur 1 mm beträgt die Glasquerschnittsfläche noch rund $43,8\%$ von der des Vollzylinders, sodass auch hier weiterhin der Wärmebrückeneffekt vorhanden ist, der den thermischen Widerstand im vorderen Bereich herabsetzt. Mit abnehmender Glaszylinderlänge reduziert sich der Unterschied zwischen Voll- und Hohlmaterial hinsichtlich der effektiven Wärmeleitfähigkeit.

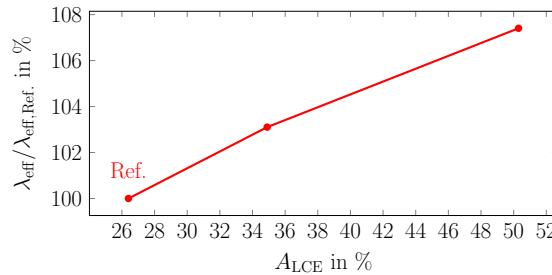
Der Einfluss der Durchmesser der Stufenbohrung (d_1/d_2) auf die effektive Wärmeleitfä-



(a) Abhängigkeit von der Länge (L_{Glas}) und Form des Verschlusselements.



(b) Abhängigkeit von den Durchmessern der Stufenbohrung (d_1/d_2).



(c) Abhängigkeit vom Flächenanteil der lichtleitenden Elemente an der Wandaußenseite (A_{LCE}).

Abbildung 7.9: Einfluss verschiedener Konstruktionsmerkmale auf die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}).

higkeit aus Abbildung 7.9b ist, im Vergleich zur Variation der Glaszylinderlänge, nur von untergeordneter Bedeutung. Mit der Verringerung des L/D -Verhältnisses (zunehmende Bohrungsdurchmesser) steigt die effektive Wärmeleitfähigkeit an, da der Einfluss der langwelligen Wärmestrahlung innerhalb der Bohrungen zunimmt. Bei der Reduktion der Durchmesser auf 4 mm/3 mm kann λ_{eff} um $-2,1\%$ verringert werden. Einen stärkeren Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat der in Abbildung 7.9c dargestellte Flächenanteil der lichtleitenden Elemente auf der Außenfassade (A_{LCE}), wobei hier die Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit einem ansteigenden Flächenanteil korreliert. Dieser Sachverhalt resultiert aus dem zunehmenden Anteil an Glas (Wärmebrücke) und Wärmestrahlung innerhalb der Kapillare.

7.3.1.2 Einfluss auf den Gesamtenergiedurchlassgrad

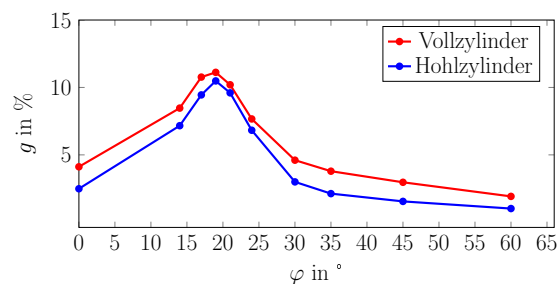
Zur Bewertung der Auswirkungen der konstruktiven Änderungen auf den winterlichen bzw. sommerlichen Wärmeeintrag wird der Gesamtenergiedurchlassgrad (g) herangezogen. Die Abbildungen 7.10a, 7.10b und 7.10c zeigen die Abhängigkeit des Gesamtenergiedurchlassgrads von der Zylinderform (Vollzylinder und Hohlzylinder) und der -länge (20 mm, 10 mm und 5 mm). In den dargestellten Abbildungen können zwei Tendenzen identifiziert werden. Mit abnehmender Zylinderlänge ergibt sich, bei gleichbleibender Form, eine geringfügige Reduktion von g , die auf die axiale Verschiebung der Übergangszone der Bohrungsdurchmesser (von 8 mm auf 6 mm) und demzufolge eine andere Position der Strahlungsabsorption zurückzu-

führen ist. Weiterhin nimmt der Unterschied in g , ähnlich der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus Abbildung 7.9a, zwischen Voll- und Hohlzylinder mit reduzierter Zylinderlänge ab. Das Verschlusselement weist, entsprechend den Untersuchungen, insgesamt nur einen geringen, negativen Einfluss auf den Gesamtenergiedurchlassgrad auf, jedoch kann durch die Verkürzung, wie in Abschnitt 7.3.1.1 erläutert, die effektive Wärmeleitfähigkeit vergleichsweise stark reduziert werden.

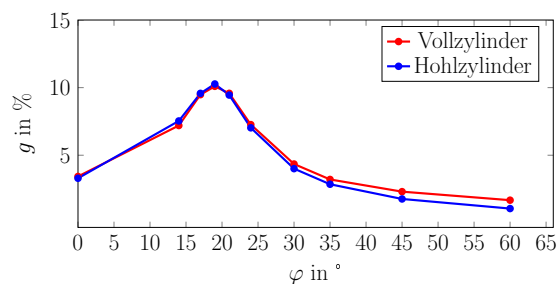
Unter Betrachtung des Einflusses des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente (A_{LCE}) auf den Gesamtenergiedurchlassgrad in Abbildung 7.10d, ergeben sich insbesondere bei Einstrahlwinkeln mit geringer Abweichung um den Auslegungspunkt (19°) deutlich höhere solare Gewinne mit zunehmendem Flächenanteil. Bei 19° bewirkt eine Erhöhung des Flächenanteils von 26,4 % auf 50,3 % eine Zunahme des Gesamtenergiedurchlassgrads von 11,7 % auf 19,1 % (Zielwert: 20 % entsprechend Abschnitt 2.4). Dieser Sachverhalt ist insbesondere für die winterliche Einstrahlsituation von Vorteil, da hierdurch dem Transmissionswärmeverlust durch die höheren solaren Gewinne stärker entgegengewirkt werden kann. Bei hohen Einstrahlwinkeln (z. B. 60°) erfolgt auch bei einem Flächenanteil von 50,3 % nur ein um 1 % höherer Gesamtenergiedurchlassgrad gegenüber 26,4 % (2,9 % vs. 1,9 %), da auch bei zunehmendem A_{LCE} die Strahlung vornehmlich im vorderen Bereich absorbiert und unmittelbar an die Umgebung abgegeben wird. Ein zunehmender Flächenanteil hat somit einen vielversprechenden Einfluss auf den sommerlichen Überhitzungsschutz und die winterlichen Energiegewinne, allerdings erhöht sich hierdurch auch die effektive Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abbildung 7.9c). Bei der Auswahl dieser Größe kann daher keine grundlegende Empfehlung zur Erhöhung gegeben werden, wenn durch den solaren Mehrertrag nicht die höheren Wärmeverluste ausgeglichen werden können.

Die Variation des Absorptionsgrads der Absorberfläche (α_{Absorber}) ist in Abbildung 7.10e dargestellt. Wie hieraus ersichtlich ist, hat eine Variation von α_{Absorber} nahezu keinen Einfluss auf den Gesamtenergiedurchlassgrad. Dies lässt sich auf die diffus reflektierenden Eigenschaften der Absorberfläche zurückführen, die bei entsprechend großem L/D -Verhältnis dazu führen, dass die unmittelbar an den Absorber angrenzenden Oberflächen den Großteil der reflektierten Strahlen absorbieren. Daraus resultieren für Einstrahlwinkel nahe des Auslegungswinkels (19°) nur marginale Abweichungen von g . Für größere Abweichungen von 19° trifft nur eine äußerst geringe Menge an Solarstrahlung auf den Absorber, sodass in diesem Bereich kein Einfluss von α_{Absorber} auf g vorliegt.

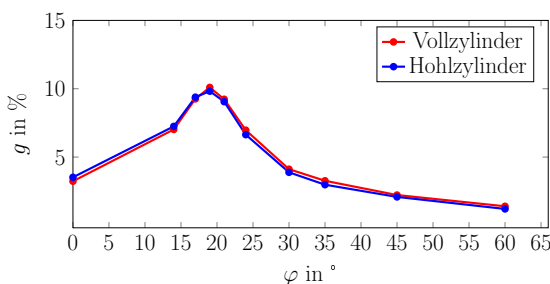
Wie bereits in Abschnitt 7.2.1.3 ausgeführt, soll auch der Einfluss verschiedener Durchmesser auf den Gesamtenergiedurchlassgrad ermittelt werden. Abbildung 7.10f zeigt g für die Durchmesser-Verhältnisse von 12 mm/9 mm, 8 mm/6 mm und 4 mm/3 mm. In den nachfolgenden Untersuchungen soll zudem, gegenüber den in den Abbildungen 7.10a bis 7.10e veranschaulichten Parameterstudien, in denen die Parallelitätsabweichung der Lichtstrahlen des Solarsimulators (Konuswinkel 4°) im Simulationsmodell verwendet wurde, eine Variation



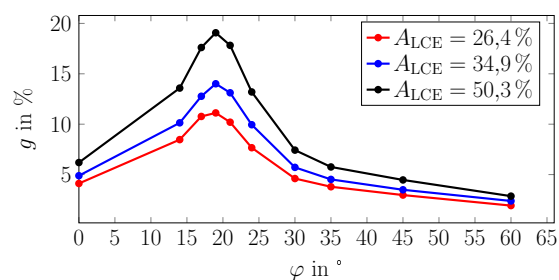
(a) Abhängigkeit von Form und Einstrahlwinkel (φ) für eine Zylinderlänge von 20 mm.



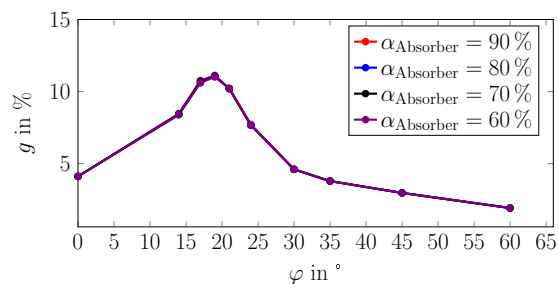
(b) Abhängigkeit von Form und Einstrahlwinkel (φ) für eine Zylinderlänge von 10 mm.



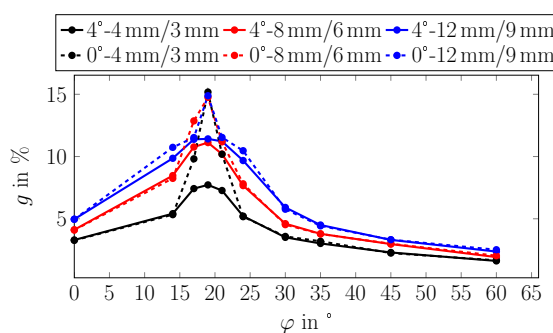
(c) Abhängigkeit von Form und Einstrahlwinkel (φ) für eine Zylinderlänge von 5 mm.



(d) Abhängigkeit vom Flächenanteil der lichtleitenden Elemente an der Wandaußenseite (A_{LCE}) und vom Einstrahlwinkel (φ).



(e) Abhängigkeit vom Absorptionsgrad der Absorberfläche (α_{Absorber}) für verschiedene Einstrahlwinkel (φ).



(f) Abhängigkeit von der Parallelität der einfallenden Lichtstrahlen, den Durchmessern der Bohrungen (d_1/d_2) und dem Einstrahlwinkel (φ).

Abbildung 7.10: Einfluss verschiedener Konstruktionsmerkmale auf den Gesamtenergiedurchlassgrad (g).

dieser Parallelität erfolgen. Dabei wird für alle Durchmesser-Verhältnisse eine Simulation mit einem Konuswinkel von 0° (parallele Lichtstrahlen) durchgeführt. Wie aus Abbildung 7.10f ersichtlich wird, ergibt sich, insbesondere beim Auslegungswinkel von 19° und in unmittelbarer Nähe, für alle Durchmesser-Verhältnisse mit zunehmender Parallelität der Lichtstrahlen ein höherer Gesamtenergiedurchlassgrad. Unabhängig von der Parallelität der Lichtstrahlen ergeben sich in der Nähe des Auslegungswinkels die höchsten Gesamtenergiedurchlassgrade für das geringste untersuchte L/D -Verhältnis (12 mm/9 mm). Der Einfluss des L/D -Verhältnisses zeigt sich auch bei größeren Abweichungen des Einstrahlwinkels von 19° , wobei auch hier geringere Verhältnisse einen höheren Gesamtenergiedurchlassgrad ermöglichen. Dieser Sachverhalt resultiert daraus, dass insgesamt an den Kapillarwänden weniger Reflexionen der Lichtstrahlen auf dem Weg zum Absorber auftreten. Für hohe Einstrahlwinkel (z. B. 60°) erfolgt, ähnlich dem Verhalten bei der Variation des A_{LCE} , eine signifikante Reduktion der Unterschiede in g für die Durchmesser 12 mm/9 mm, 8 mm/6 mm und 4 mm/3 mm, was zum sommerlichen Überhitzungsschutz beiträgt. Generell muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass zwar ein höherer solarer Gewinn mit abnehmendem L/D -Verhältnis möglich ist, allerdings erhöht sich hierdurch auch der Einfluss der natürlichen Konvektion und der langwelligen Wärmestrahlung innerhalb der Bohrungen (höheres λ_{eff} , vgl. Abbildung 7.9b). Aus diesem Grund kann keine generelle Empfehlung zur Minimierung des L/D -Verhältnisses gegeben werden. Die gezielte Ermittlung der optimalen Durchmesser, gemeinsam mit dem Anstellwinkel der lichtleitenden Elemente zur Horizontalen (vgl. Abschnitt 7.2.1) und dem Flächenanteil der lichtleitenden Elemente, muss in einer standortspezifischen, simulativen Untersuchung über einen Zeitraum von mehreren Jahren mit realen Klimadaten erfolgen. Hierbei müssen die stationären Wärmeverluste, die winterlichen Einspareffekte und die sommerliche Überhitzung in Form einer Zielfunktion für eine mathematische Optimierungsaufgabe in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

7.3.2 Jährliche Einspareffekte durch das solarselektive Wärmedämmsystem

Die nachfolgenden Abschnitte präsentieren die Energieeinsparungen der solarselektiven Wandaufbauten (#1 und #2) gegenüber der herkömmlichen Dämmung (vgl. Abschnitt 7.2.2.1). Zudem wird eine alternative Berechnungsweise mittels eines Kennfelds vorgestellt, die anhand der solarselektiven Wandkonstruktion #1 verifiziert wird.

7.3.2.1 Bilanzierung gegenüber einem herkömmlichen Dämmsystem

Die in Abbildung 7.7 vorgestellte Berechnungsmethodik beginnt für die untersuchten Wandkonstruktionen aus Abbildung 7.4 am 16.09. mit der berechneten stationären Ausgangstemperaturverteilung (3. in Abbildung 7.7). Den Wandaufbauten steht somit eine Einschwingzeit von rund einer Woche vor dem ersten Auswertzeitraum (Heizgrenztemperatur von 15°) ab

dem 22.09. zur Verfügung.

Abbildung 7.11 zeigt, beginnend ab dem 22.09., die Temperatur in der Absorber- bzw. hinter Dämmschicht (T_{abs}) für die untersuchten Wandkonstruktionen. Hierbei kann grundsätzlich festgestellt werden, dass T_{abs} der solarselektiven Wandkonstruktionen #1 und #2 im Herbst und insbesondere im Winter deutlich stärkeren Schwankungen als im Sommer unterliegt. Dies ist auf die solaren Erträge für die geringeren Einstrahlwinkel zurückzuführen, die eine entsprechende Erhöhung der Temperatur in der Absorber- bzw. hinter Dämmschicht ermöglichen. Im Sommer erfolgt vornehmlich eine Absorption im vorderen Bereich des solarselektiven Systems. Allerdings steigt T_{abs} der solarselektiven Wandaufbauten stärker an, als bei Verwendung eines herkömmlichen Systems. Dies ist jedoch vor allem auf den höheren Absorptionsgrad des Putzes im lichtleitenden Element gegenüber der Außenwandfarbe zurückzuführen, was bereits in den Prüfstandsuntersuchungen (vgl. Abbildung 5.6) in einer höheren T_{abs} resultierte. Bei besonders geringen Umgebungslufttemperaturen mit Tagesdurchschnittstemperaturen in der Größenordnung von rund -10°C und gleichzeitig vergleichsweise hoher Solarstrahlungsintensität (vgl. Abbildung 7.5 Tag 166 bzw. Stunde 3800) weist die solarselektive Wandkonstruktion #2 im Zeitraum 3700 h bis 3900 h eine ca. 2,2 K höhere mittlere Temperatur in der Absorberschicht gegenüber dem herkömmlichen Wandaufbau auf.

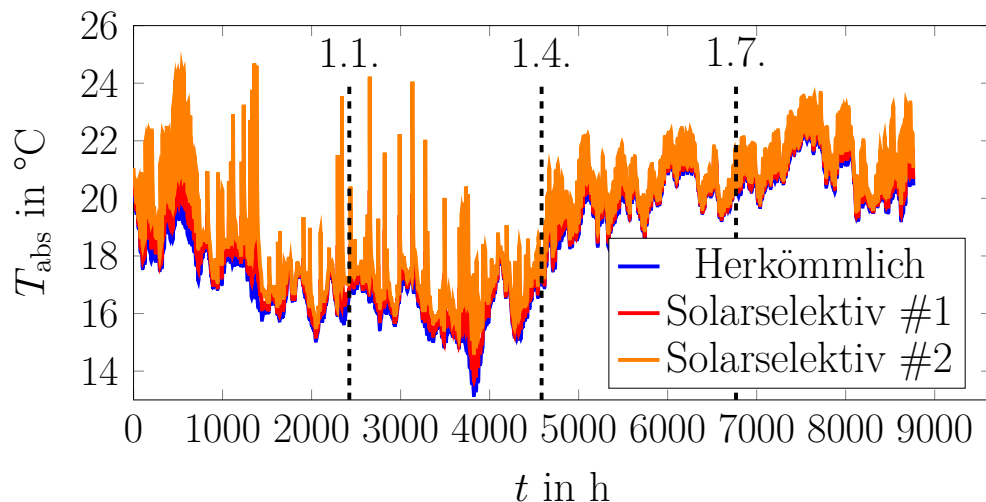


Abbildung 7.11: Temperatur in der Absorber- bzw. hinter der Dämmschicht (T_{abs}) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).

Abbildung 7.12 zeigt die Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{Is}}$) für die herkömmliche Wandkonstruktion und die solarselektiven Varianten #1 und #2. Positive Wärmestromdichten entsprechen einem Wärmefluss in Richtung der Wandaußenseite, d. h. einem Transmissionswärmeverlust. Vergleicht man auch hier die Wandkonstruktionen miteinander, zeigen sich Mitte Oktober (Stunde 560) solare Gewinne bei Wandkonstruktion #2. Hierbei

überschreitet die Oberflächentemperatur auf der Wandinnenseite die Innenlufttemperatur von 21 °C, wodurch die Wärme in den Innenraum abgegeben wird ($\dot{q}_{IS} < 0 \frac{W}{m^2}$). Auch in den Wintermonaten wird, bei geeigneten Einstrahlwinkeln und ausreichender Solarstrahlungsinintensität, eine Reduktion der Wärmestromdichte erreicht. Der maximale Wärmeverlust kann durch den solarselektiven Wandaufbau #2 bei der geringsten Tagesmitteltemperatur (Stunde 3800) gegenüber dem herkömmlichen Wandaufbau um rund 25 % reduziert werden (von $11,4 \frac{W}{m^2}$ auf $8,4 \frac{W}{m^2}$). Einzelne Peak-Transmissionswärmeverluste können somit, bei geeigneter Konstellation der solaren Einstrahlbedingungen, deutlich abgeschwächt werden.

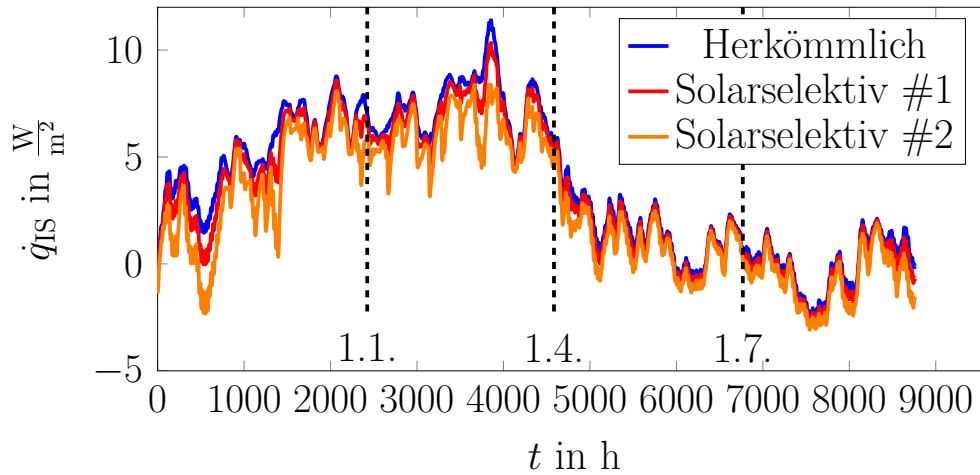


Abbildung 7.12: Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{IS}$) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).

Bei Betrachtung der Wärmestromdichten in den Sommermonaten (21.05. - 21.09., Stunde 5784 bis 8760) aus Abbildung 7.13, die in den Innenraum abgegeben werden ($\dot{q}_{IS} < 0 \frac{W}{m^2}$), zeigt sich nur eine geringfügige Verschiebung der jeweiligen Kurven zu geringeren Werten (höherer Wärmeeintrag). Ein Großteil der Wärme wird in der Nähe des Verschlusselements absorbiert und unmittelbar an die Umgebung abgegeben. Der Wärmeeintrag ins Vollziegelmauerwerk bzw. der -transport zur Wandinnenseite erfolgt nahezu ausschließlich durch thermische Diffusionsprozesse im lichtleitenden Element, sodass keine Peak-Wärmeströme im Sommer auftreten.

Die Auswertung von Gleichung (7.2) zur Bestimmung der flächenspezifischen Energiemengen, die in Abbildung 7.14 dargestellt sind, erfolgt für die Zeiträume 22.09. - 20.05. (Heizperiode 15°), 21.10. - 03.04. (Heizperiode 10°) und 21.05. - 21.09. (Sommermonate) für die herkömmliche Wandkonstruktion und die solarselektiven Wandaufbauten #1 und #2. Der herkömmliche Wandaufbau weist, aufgrund von Wärmeleitung (WV WL), berechnete Wärmeverluste von $q_{IS}^{22.09. \rightarrow 20.05.} = 31,82 \frac{kWh}{m^2} / q_{IS}^{21.10. \rightarrow 03.04.} = 27,17 \frac{kWh}{m^2}$ auf, während die Wärmeverluste für die solarselektiven Wandkonstruktionen #1 und #2 nur $28,84 \frac{kWh}{m^2} / 25,22 \frac{kWh}{m^2}$ bzw. $23,71 \frac{kWh}{m^2} / 21,76 \frac{kWh}{m^2}$ betragen. Allerdings muss, wie in Abschnitt 7.2.2.1 erwähnt, der

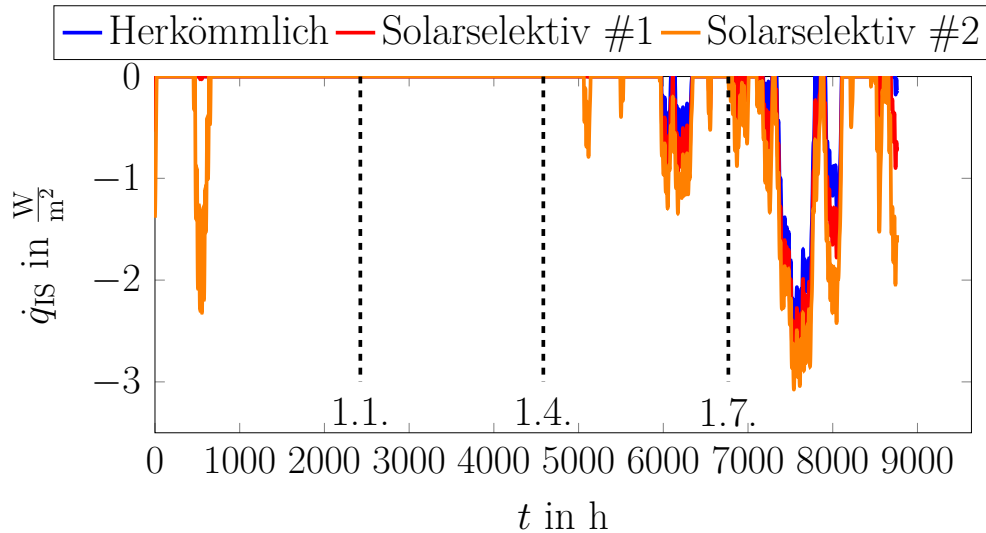


Abbildung 7.13: In den Innenraum abgegebene Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{IS} < 0 \frac{W}{m^2}$) für den herkömmlichen Wandaufbau und die solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2).

erhöhte Wärmeverlust durch die zusätzliche langwellige Wärmestrahlung (WV WL+WS) mittels des U -Wert Verhältnisses berücksichtigt werden. Daraus ergeben sich für die solarselektiven Wandkonstruktionen #1 und #2 tatsächliche Wärmeverluste von $30,88 \frac{kWh}{m^2} / 27 \frac{kWh}{m^2}$ bzw. $28,06 \frac{kWh}{m^2} / 25,75 \frac{kWh}{m^2}$. „Solarselektiv #1“ erzielt somit, gegenüber dem herkömmlichen Wandaufbau, absolute und relative effektive solare Gewinne (SGH) von $0,94 \frac{kWh}{m^2} / 0,17 \frac{kWh}{m^2}$ bzw. $3,0\% / 0,6\%$. Die Variante „Solarselektiv #2“, die bereits konstruktive Verbesserungen durch die Parameterstudie aus Abschnitt 7.2.1 beinhaltet, ermöglicht eine Reduktion um $3,76 \frac{kWh}{m^2} / 1,42 \frac{kWh}{m^2}$ bzw. $11,8\% / 5,2\%$. Zur Bilanzierung der gegenüber der herkömmlichen Variante zusätzlich notwendigen Kühlenergie, die zur Aufrechterhaltung der Innenlufttemperatur von $21^\circ C$ notwendig ist, werden im Zeitraum 21.05. - 21.09. (Stunde 5784 bis 8760) die in Abbildung 7.13 dargestellten negativen Wärmestromdichten verwendet. Hierbei ergeben sich, gegenüber dem herkömmlichen Aufbau, effektive Überhitzungen (UEH) von $0,43 \frac{kWh}{m^2}$ (#1) und $1,29 \frac{kWh}{m^2}$ (#2). Absolut betrachtet kann somit, durch die Verbesserung des konstruktiven Aufbaus von #1 auf #2, der solare Gewinn (SGH) um $2,82 \frac{kWh}{m^2} / 1,25 \frac{kWh}{m^2}$ erhöht werden, während die Überhitzung (UEH) lediglich um $0,86 \frac{kWh}{m^2}$ zunimmt.

7.3.2.2 Eindimensionales Modell und Kennfeldinterpolation

Die in Abschnitt 7.2.2.4 vorgestellte Methodik, unter Verwendung eines eindimensionalen Modells der Wandkonstruktion sowie eines Kennfelds zur Berücksichtigung der im lichtleitenden Element auftretenden Wärmeströme, wird im Folgenden evaluiert. Abbildung 7.15 zeigt das mittels Ray Tracing ermittelte und ausschließlich für die solarselektive Wandkonstruktion #1 gültige Kennfeld für $I_{S,\perp,ref} = 1000 \frac{W}{m^2}$ mit $0^\circ \leq \varphi \leq 66^\circ$, $0^\circ \leq \psi \leq 88^\circ$ und $0 m \leq z \leq 0,08 m$,

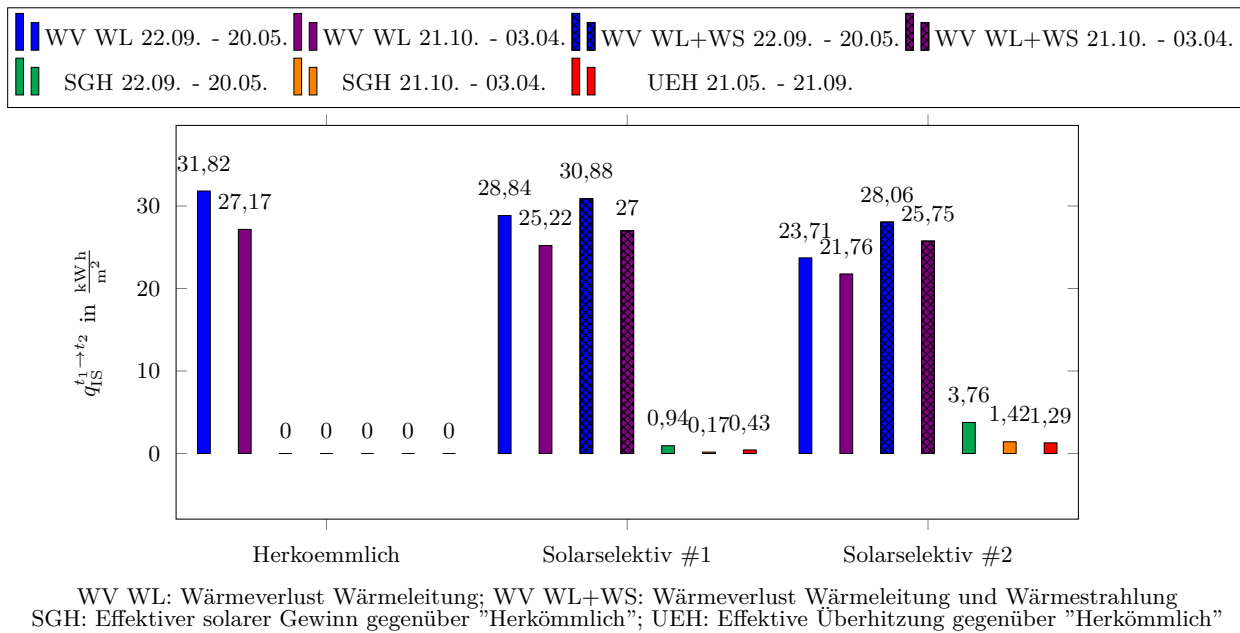


Abbildung 7.14: Bilanzierung der Wärmeverluste mit Wärmeleitung (WV WL), der Wärmeverluste mit Wärmeleitung und Wärmestrahlung (WV WL+WS), der effektiven solaren Gewinne (SGH) und der effektiven Überhitzung (UEH) der solarselektiven Wandkonstruktionen (#1 und #2) gegenüber der herkömmlichen Wandkonstruktion für verschiedene Auswertzeiträume.

welches für Schrittweiten von $\Delta\varphi = \Delta\psi = 2^\circ$ und $\Delta z = 5 \text{ mm}$ berechnet wurde. Da es sich bei den vorliegenden Untersuchungen um eine südorientierte Fassade handelt, ist die Berechnung des halben Kennfelds, aufgrund einer symmetrischen Strahlungsverteilung um die φ -Achse, ausreichend. Die Farbcodierung in Abbildung 7.15 berücksichtigt auch die auf der Wandaußenseite ($z = 0,08 \text{ m}$) auftretenden, vergleichsweise hohen Wärmeströme (große Fläche), sodass ein Großteil der farblich gekennzeichneten Stützpunkte im unteren Bereich der Farbcodierung liegt. Auf der φ -Achse ($\psi = 0^\circ$) ist jedoch das Eindringen der Strahlung bis hin zum Absorber ($z = 0 \text{ m}$) in der Nähe des Auslegungspunkts ($\varphi = 19^\circ$) gut zu erkennen.

Die ermittelten Strahlungswärmeströme werden als Wärmequellendichte in Gleichung (7.3) appliziert, wobei der Skalierungsfaktor aus Gleichung (7.4), zur Berücksichtigung der tatsächlichen Strahlungsintensität ($I_{s,\perp}(t)$) gegenüber dem Referenzzustand ($I_{s,\perp,\text{ref}}$)), verwendet wird. Abbildung 7.16 zeigt die Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$) der solarselektiven Wandkonstruktion #1 sowie des eindimensionalen Modells nach Gleichung (7.3). Vergleicht man die beiden Kurvenverläufe miteinander, ergibt sich qualitativ eine äußerst gute Übereinstimmung der Wärmestromdichten. Auffällig ist, dass bis ca. $t = 4000 \text{ h}$ vereinzelt Abweichungen auftreten, wenn für das solarselektive Wärmedämmsystem förderliche Einstrahlkonstellationen (geringer Einstrahlwinkel, hohe Strahlungsintensität) vorliegen. In diesen Fällen kann das eindimensionale Modell die tatsächliche Reduktion

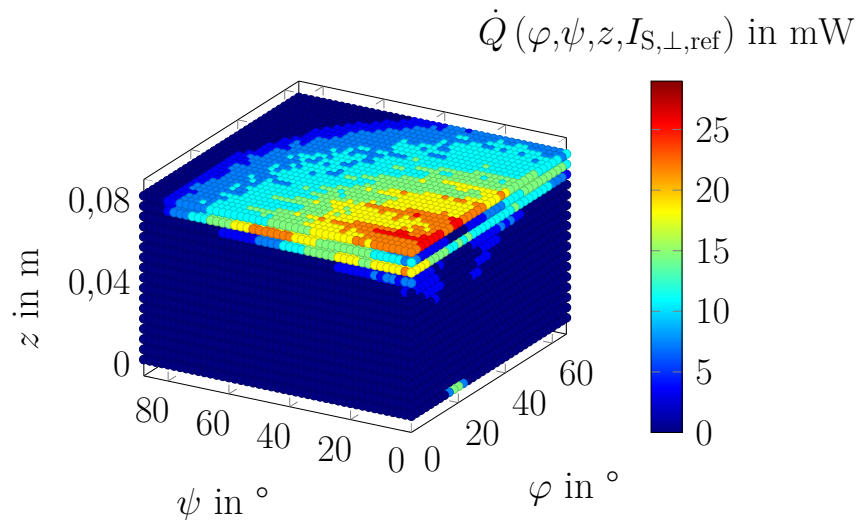


Abbildung 7.15: Um φ -Achse symmetrisches Kennfeld der Strahlungswärmeströme der solarselektiven Wandkonstruktion #1 für $\Delta\varphi = \Delta\psi = 2^\circ$ und $\Delta z = 5$ mm.

der Wärmestromdichte nicht vollständig wiedergeben. Bei höheren Einstrahlwinkeln ab $t = 4000$ h sind beide Kurvenverläufe nahezu identisch, da die Lichtstrahlen fast ausschließlich im Bereich des Glaskörpers absorbiert und somit Peak-Wärmestromdichten vermieden werden. Führt man einen integralen jährlichen Vergleich ($q_{\text{IS}}^{22.09. \rightarrow 21.09.}$) der beiden Verläufe durch, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Zeitraum von 98 % bei einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit von 312,5 h auf 6,25 h durch das eindimensionale Modell. Für etwaige Verbesserungen dieser Methodik muss überprüft werden, ob im Bereich geringer Einstrahlwinkel reduzierte Schrittweiten ($\Delta\varphi$, $\Delta\psi$ und Δz) zu einer noch höheren Übereinstimmung der Kurvenverläufe führen, und ob die höhere Genauigkeit in Relation zum zusätzlichen Berechnungsaufwand des Kennfelds steht.

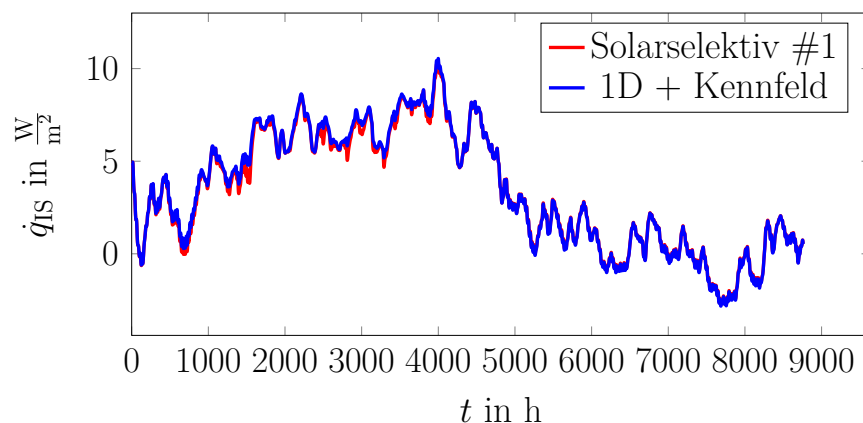


Abbildung 7.16: Vergleich zwischen der Wärmestromdichte auf der Wandinnenseite ($\dot{q}_{\text{IS}}$) der solarselektiven Wandkonstruktion #1 und dem eindimensionalen Modell mit Kennfeldinterpolation.

7.4 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Kapitels wurden Parameterstudien zum Einfluss des konstruktiven Aufbaus des solar selektiven Wärmedämmsystems auf die effektive Wärmeleitfähigkeit sowie den solaren Gewinn, der in den vorliegenden Untersuchungen über den Gesamtenergiedurchlassgrad bewertet wurde, vorgenommen. Gegenüber dem Prototyp des solar selektiven Wärmedämmsystems aus Abschnitt 3.3.5 wurden die Länge und die Form des Verschlusselements, der kurzwellige Absorptionsgrad des Absorbers, der vordere und hintere Durchmesser der Stufenbohrung sowie der Flächenanteil der lichtleitenden Elemente auf der Wandaußenseite variiert. In Bezug auf die effektive Wärmeleitfähigkeit konnte die größte Reduktion durch die Verkürzung der Länge des Verschlusselements auf 5 mm erreicht werden, wobei, im Gegensatz zum Ausgangszustand (20 mm), der Wärmeverlust um $-14,8\%$ gesenkt werden konnte. Eine Vergrößerung der beiden Durchmesser der Stufenbohrung sowie die Erhöhung des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente hatten eine Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit zur Folge.

Die Verkürzung der Glaskörper hatte nur einen unwesentlichen Einfluss auf den Gesamtenergiedurchlassgrad, sodass für diesen Konstruktionsparameter eine Verminderung der Länge angestrebt werden sollte. Eine Erhöhung des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente auf der Wandaußenseite führte im Bereich des Auslegungspunkts zu einer signifikanten Erhöhung des Gesamtenergiedurchlassgrads, während bei höheren Einstrahlwinkeln, aufgrund der sich immer weiter zur Wandaußenseite verlagernden Position der Strahlungsabsorption, nur geringfügige Erhöhungen des Gesamtenergiedurchlassgrads in der Größenordnung von 1% auftraten. Als weitere wesentliche Einflussgröße wurden der vordere und hintere Durchmesser der Stufenbohrung identifiziert. Bei gleichbleibendem Flächenverhältnis kann durch eine Reduktion des L/D -Verhältnisses ein solarer Mehrertrag generiert werden, da weniger interne Reflexionen der Lichtstrahlen auf dem Weg zum Absorber auftreten. Weiterhin nimmt die Bedeutung der Parallelität der Lichtstrahlen bei zunehmenden L/D -Verhältnissen am Auslegungspunkt bzw. in dessen unmittelbarer Nähe zu. Eine allgemeine Empfehlung zur Minimierung des L/D -Verhältnisses bzw. zur Maximierung des Flächenanteils der lichtleitenden Elemente kann nicht gegeben werden, da hierdurch die effektive Wärmeleitfähigkeit zunimmt. Ein probates Mittel stellt hier eine über mehrere Jahre durchgeführte, energetische Simulation der solar selektiven Wandkonstruktion unter Berücksichtigung dieser Konstruktionsparameter (d_1/d_2 und A_{LCE}) dar. Darüber hinaus kann auch der Anstellwinkel der lichtleitenden Elemente zur Horizontalen in die jährliche Simulation einbezogen werden. Aus derartigen Untersuchungen können die tatsächlichen Netto-Energiegewinne durch die vorgenommenen Konstruktionsänderungen ermittelt werden.

Weiterhin beinhaltet dieses Kapitel eine jährliche Untersuchung einer herkömmlichen Wandkonstruktion sowie zweier solar selektiver Wandaufbauten. Die Variante „Solar selektiv

#1“, die nur geringfügig vom erstellten Prototyp (vgl. Abschnitt 3.3.5) abweicht, weist über den Zeitraum 22.09. bis 20.05. (Überschreitung der Heizgrenztemperatur von 15 °C) einen gegenüber der herkömmlichen Variante um 3 % reduzierten Wärmeverlust auf. Der auf Basis der Ergebnisse der Parameterstudie verbesserte Wandaufbau „Solarselektiv #2“ zeigt über den gleichen Zeitraum eine Reduktion des Energieverlusts um 11,8 %. Stellt man den Mehrertrag an in den Innenraum abgegebener Wärme in der verbleibenden Zeit (21.05. - 21.09.) den solaren Gewinnen in der Heizperiode gegenüber (22.09. - 20.05.), zeigt sich, dass der absolute Energiegewinn durch die Modifikation der solarselektiven Wandkonstruktionen von #1 zu #2 um $2,82 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ zunimmt, während sich der sommerliche Mehrertrag auf nur $0,86 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ beläuft.

Zur Nutzung der solargewinnenden Eigenschaften des solarselektiven Wandaufbaus in vereinfachter Form wurde eine Methodik vorgestellt und verifiziert, die mittels eines ein-dimensionalen Modells und eines Kennfelds die winkel-, orts- und intensitätsabhängigen Strahlungswärmeströme als interne Wärmequellen berücksichtigt. Hierbei wurde das Kennfeld mit Schrittweiten der unabhängigen Größen von $\Delta\varphi = \Delta\psi = 2^\circ$ und $\Delta z = 5 \text{ mm}$ durch Ray Tracing-Simulationen bei einer Referenzintensität von $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ erstellt. Dabei konnte, in einer vergleichenden Jahressimulation mit dem solarselektiven Wandaufbau #1, eine integrale jährliche Übereinstimmung von 98 % bei einer Verminderung der Berechnungszeit von 312,5 h auf 6,25 h erzielt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Kern-Erkenntnisse der konstruktiven, experimentellen und theoretischen Entwicklungsschritte zusammengefasst, die zur Erreichung der Zielsetzungen des in Kapitel 1 vorgestellten SATIS-Konzepts durchgeführt wurden. Weiterhin wird ein Ausblick auf mögliche, noch zu behandelnde Themenaspekte zur Weiterführung dieser Arbeit gegeben. Für ausführlichere Darstellungen der Ergebnisse sei an dieser Stelle auf die zugehörigen Zusammenfassungen am Ende der entsprechenden Kapitel verwiesen.

8.1 Zusammenfassung

Zur Vermessung verschiedener Wandkonstruktionen, die aus einem Vollziegelmauerwerk-Grundaufbau und verschiedenen innovativen Dämmsystemen bestehen, wurde ein Differenzklimakammerprüfstand konzipiert und errichtet, der sowohl stationäre als auch dynamische Untersuchungen zum Wärme- und Solarstrahlungstransport bei unterschiedlichen Umwelteinflüssen ermöglicht. Zu diesen äußeren Einflüssen auf die Wandaufbauten, die im Prüfstand nachgebildet werden können, zählen beispielsweise sommerliche und winterliche Lufttemperaturen, Solarstrahlungsintensitäten und Solarstrahlungswinkel. Bei den Grundmaterialien der in dieser Arbeit messtechnisch untersuchten, gedämmten Wandkonstruktionen handelt es sich bei allen Varianten um mineralische Hochleistungswärmedämmputze (HLWDP). Diese stellen, aufgrund ihrer hygrothermischen Eigenschaften und einfachen Verarbeitbarkeit, eine sinnvolle und ökologische Alternative bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden, die oftmals eine gute Wärmespeicherfähigkeit aber ein geringes Dämmvermögen aufweisen, dar. Nachteilig hierbei ist, dass etwaige (winterliche) solare Gewinne, die im Mauerwerk gespeichert werden könnten, aufgrund der außen angebrachten Dämmung nicht bis zur Speichermasse transportiert werden können. Aufbauend auf dieser Tatsache wurde das wesentliche, sich über mehrere Kapitel erstreckende Ziel dieser Arbeit definiert: Die konstruktive Entwicklung sowie die experimentelle und numerische Untersuchung eines solar-selektiven Wärmedämmsystems (SATIS), welches auf einem neuartigen Mikrohohlglaskugel (MHGK)-HLWDP basiert.

Stationäre Untersuchungen zur Ermittlung des für die jeweiligen Wandaufbauten charakteristischen Wärmeleitwerts wurden für eine ungedämmte Wandkonstruktion und zwei mit HLWDP versehenen Wandaufbauten durchgeführt. Bei der ungedämmten Wandkonstruktion wurde, unter begründeter Annahme eines eindimensionalen Wärmestroms, der

Wärmeleitwert anhand der wandinnen- und wandaußenseitigen Wärmestromdichten und Oberflächentemperaturen bestimmt. Für die Ermittlung des Wärmeleitwerts im Fall der gedämmten Wandkonstruktionen (Mikrohohlglaskugel- bzw. Aerogel-HLWDP) wurde eine für den errichteten Prüfstand entwickelte Methodik, unter Verwendung eines Parameteridentifikationsverfahrens, angewandt und verifiziert. Bei den durchgeführten stationären Untersuchungen wurden die Wärmeleitwerte für die ungedämmte, die MHGK- und die Aerogel-Wandkonstruktion zu $1,79 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$, $0,42 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ und $0,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ bestimmt.

Die Quantifizierung des solaren Gewinns der Wandkonstruktionen wurde in den Prüfstandsuntersuchungen zum einen über den Gesamtenergiedurchlassgrad (stationär), zum anderen über eine eigens hierfür entwickelte Methodik, welche dynamische Wärmeleit- und Wärmespeichervorgänge im Vollziegelmauerwerk bzw. HLWDP unter verschiedenen Sonneneinstrahlungswinkeln berücksichtigt, vorgenommen. Unter definierten Umweltrandbedingungen konnte, durch den Gesamtenergiedurchlassgrad und weiterer Leistungskenngrößen, die winkelabhängige Selektion der einfallenden Lichtstrahlen des auf Basis des MHGK-HLWDP entwickelten solarselektiven Wärmedämmsystems nachgewiesen werden. Im Best- bzw. Auslegungspunkt für Wintermonate (19° Einstrahlungswinkel) erzielte der hergestellte Prototyp des solarselektiven Systems, der eine effektive Wärmeleitfähigkeit von $57 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \text{K}}$ aufweist, in den durchgeführten stationären Untersuchungen einen Gesamtenergiedurchlassgrad von 11,2%. In den dynamischen Untersuchungen ergab sich eine rund achtmal höhere, in die Absorberschicht geleitete Energiemenge sowie ein um 15,5-mal höherer flächenspezifischer solarer Energiegewinn auf der Wandinnenseite gegenüber einem herkömmlichen MHGK-Dämmsystem gleicher Schichtstärke unter identischen Einstrahlbedingungen. Sowohl in der stationären als auch in der dynamischen Untersuchung konnten durch das solarselektive Wärmedämmsystem die solaren Gewinne für hohe Einstrahlungswinkel beträchtlich reduziert werden (sommerlicher Überhitzungsschutz).

In Bezug auf die Modellierung des Wärme- und Strahlungstransports wurde sukzessiv ein virtuelles Modell entwickelt, welches ausgehend von der ungedämmten Wandkonstruktion durch die jeweiligen Dämmsysteme erweitert und anhand der durchgeführten Experimente validiert wurde. Hierbei wurden, je nach Komplexität der Wandkonstruktion bzw. des physikalischen Phänomens, 1D- und 3D-Modelle entwickelt. Für das solarselektive Wärmedämmsystem wurde, zur Untersuchung des Strahlungstransports im lichtleitenden Element, ein auf Ray Tracing basierendes Modell entwickelt. Dabei wurde die Strahlungsverteilung für geringe und hohe Einstrahlungswinkel mit und ohne Azimuteinfluss ermittelt. Während bei geringen Abweichungen des Einstrahlungswinkels vom Auslegungspunkt des solarselektiven Systems die Solarstrahlung in der Absorberfläche absorbiert wird, findet die Absorption der Lichtstrahlen bei hohen Einstrahlungswinkeln vornehmlich in unmittelbarer Nähe der Wandaußenseite statt. Die Strahlungsverteilung wurde für die Untersuchung des stationären (Gesamtenergiedurchlassgrad) und dynamischen Wärmetransports (Energieeinspeicherung in

das Vollziegelmauerwerk) genutzt und mit den Experimenten verglichen, wobei insbesondere bei geringen Abweichungen des Einstrahlwinkels vom Bestpunkt gute Übereinstimmungen erzielt wurden. Mittels des validierten Modells wurden Untersuchungen zur solaren Wärmeeindringtiefe und zur ins Massivmauerwerk eingespeicherten Energiemenge durchgeführt, deren Ergebnisse das winkelselektive Verhalten von SATIS bestätigen.

Zur Verbesserung des solarselektiven Wärmedämmsystems wurde, mithilfe des numerischen Modells, eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Konstruktionsparameter durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Dämmwirkung am effektivsten durch die Verminderung der Länge des Verschlusselements auf der Wandaußenseite erhöht werden kann. Zur Erhöhung des solaren Gewinns konnten sowohl die Zunahme des Flächenanteils als auch die Reduktion des L/D -Verhältnisses der lichtleitenden Elemente als entscheidende Maßnahmen identifiziert werden. Der Effekt der erhöhten solaren Gewinne zeigt sich vor allem im Bereich des Auslegungswinkels (19°), während bei hohen Einstrahlwinkeln nur ein geringfügig höherer Mehrertrag an Energie vorhanden ist - was dem sommerlichen Überhitzungsschutz zugutekommt. Anhand der Parameterstudie wurden zwei solarselektive Varianten definiert, die in einer jährlichen energetischen Untersuchung mit einem herkömmlichen Wandaufbau verglichen wurden. Die energetisch bessere Wandkonstruktion, die in größerem Umfang vom hergestellten Prototyp abweicht, ermöglicht über die Heizperiode vom 22.09. bis 20.05. eine Reduktion des Wärmeverlusts um 11,8 % gegenüber dem herkömmlichen Wandaufbau. Um diese solarnutzenden Eigenschaften auch in alternativen Berechnungsprogrammen, die oftmals nur eindimensionale Berechnungsweisen verwenden, nutzen zu können, wurde eine Methodik anhand eines für die jeweilige Konstruktion gültigen Kennfelds zur Ermittlung der Strahlungswärmeströme vorgestellt. Unter Verwendung dieser Methodik konnte, im Vergleich zum Originaldatensatz, eine integrale jährliche Übereinstimmung der Berechnungsweisen von 98 % bei einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit von 312,5 h auf 6,25 h erreicht werden.

8.2 Ausblick

Für eine verbesserte Validierung der erstellten Simulationsmodelle des solarselektiven Wärmedämmsystems sollte eine Möglichkeit entwickelt werden, den gesamten Prototyp, d. h. alle lichtleitenden Elemente und die Berandungen des Probekörpers, mit hinreichender numerischer Auflösung des Rechengebiets dynamisch zu simulieren. Hierdurch könnten, unter Verwendung der Strahlungsverteilung in allen lichtleitenden Elementen, mittels des transienten Wärmetransports die thermischen Interaktionen dieser Elemente untereinander sowie der Einfluss der Randbereiche, welche zu dreidimensionalen Effekten im solarselektiven Wärmedämmsystem führen, berücksichtigt werden. Insbesondere bei höheren Einstrahlwinkeln könnten gegenüber den hier vorgestellten Modellen, welche nur ein lichtleitendes Element umfassen, verbesserte Übereinstimmungen mit den Experimenten erzielt werden.

Hinsichtlich der Bestimmung einer optimalen Kombination der Konstruktionsparameter müsste, zusätzlich zu den bereits in der Parameterstudie untersuchten Merkmalen, der Anstellwinkel der lichtleitenden Elemente zur Horizontalen berücksichtigt werden. Dieser Parameter müsste jedoch gesondert in einer mehrjährigen Simulationsstudie mit verschiedenen Wetterdatensätzen ermittelt werden, da eine integrale Bilanzierung der winterlichen Gewinne gegenüber den sommerlichen Mehreinträgen erfolgen muss. Neben dieser Größe sollte auch das L/D -Verhältnis und der Flächenanteil der lichtleitenden Elemente in die Betrachtung einfließen, da, wie bereits an der entsprechenden Stelle erwähnt, eine Verbesserung des solaren Gewinns eine Verschlechterung der effektiven Wärmeleitfähigkeit bewirkt (Pareto-Optimum). Auch hier bietet sich eine integrale jährliche Bilanzierung an, um die Netto-Energieeinspareffekte zu ermitteln. All diese Konstruktionsmerkmale sollten, eventuell unter Berücksichtigung verschiedener Gewichtungsfaktoren, entsprechend ihrer Relevanz (z. B. höhere Gewichtung des solaren Gewinns im Winter gegenüber dem sommerlichen Mehrertrag), in eine zu definierende Zielfunktion Einzug finden.

Die Herstellung der Platten des solarselektiven Wärmedämmsystems für die Untersuchungen beschränkte sich bisher auf die Verwendung des Mikrohohlglasskugel-Wärmedämmputzes. Darüber hinaus wurden die Löcher für die lichtleitenden Elemente mit einer CNC-Maschine gebohrt. Dabei ist in Betracht zu ziehen, ob ein anderes Wärmedämmmaterial möglicherweise eine verbesserte mechanische Bearbeitung bei gleichbleibender Dämmwirkung ermöglicht oder ob ein anderer Herstellungsprozess gewählt werden sollte. Darüber hinaus könnte durch die Verwendung eines Alternativmaterials auch die Stegbreite zwischen den Bohrungen weiter reduziert werden, um somit den Flächenanteil auf der Wandaußenseite zu erhöhen. Falls weiterhin ein fließfähiges Material wie der MHGK-HLWDP eingesetzt wird, könnte als alternativer Herstellungsprozess, nach z. B. der Zugabe eines Fließmittels, das Gießen in eine Negativform der Platte erfolgen. Neben der Platte selbst müssen auch Überlegungen zu deren Bestückung vorgenommen werden, um die bisherige händische Einbringung durch einen maschinellen Prozess zu ersetzen.

In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich Untersuchungen zur Applikation des solarselektiven Wärmedämmsystems an Bestandswänden mit hoher Wärmespeicherfähigkeit durchgeführt. Zur weiteren Erhöhung der Speichermasse von Bestandsgebäuden wurde die Wandkonstruktion WK5, welche eine PCM-Schicht beinhaltet, mittels des dynamischen Testverfahrens untersucht. Ein wesentliches Ziel muss die Möglichkeit der dynamischen Simulation der Latentwärmespeicherung sein, sodass, ähnlich zu den durchgeführten Parameterstudien in Kapitel 7, der Einfluss der Parameter „Einbringungsort“ (Position in der Wandkonstruktion), „Einbringungsmenge“ sowie „Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur“ auf die sommerliche Überhitzung bzw. die winterliche Energieeinsparung ermittelt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Die Energie der Zukunft: Vierter Monitoring - Bericht zur Energiewende. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2015. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/vierter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D16 besucht am 12.04.2021.
- [2] Umweltbundesamt: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern mit politischen Zielen. 2021. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_entw-pev-energietraeger-polit-ziele_2021-03-22.pdf besucht am 12.04.2021.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent. 2021. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent/> besucht am 12.04.2021.
- [4] United Nations Environment Programme: Buildings and Climate Change - Summary for Decision Makers. 2009. URL: <https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/unep207.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2015. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=25 besucht am 12.04.2021.
- [6] Staniaszek, D.; Anagnostopoulos, F.; Lottes, R.: Die Sanierung des deutschen Gebäudebestands: Eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht. Berlin, 2015. URL: http://bpie.eu/wp-content/uploads/2016/02/BPIE_Renovating-Germany-s-Building-Stock-_DE_09.pdf besucht am 12.04.2021.
- [7] Deutsche Energie-Agentur: dena-Gebäudereport Kompakt 2018: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Hrsg. von Deutsche Energie-Agentur. Berlin, 2018. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9254_Gebaeudereport_dena_kompakt_2018.pdf besucht am 12.04.2021.

- [8] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). 2013. URL: https://enev-online.com/enev_2014_volltext/enev_2014_verkuendung_bundesgesetzblatt_21.11.2013_leseversion.pdf besucht am 12.04.2021.
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Sanierungsbedarf im Gebäudebestand: Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2014. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand.pdf?__blob=publicationFile&v=3 besucht am 12.04.2021.
- [10] Cischinsky, H.; Diefenbach, N.: Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016: Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Bd. F 3080. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [11] Deutsche Energie-Agentur: dena-Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Hrsg. von Deutsche Energie-Agentur. Berlin, 2016. URL: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf besucht am 12.04.2021.
- [12] Thamling, N.; Pehnt, M.; Kirchner, J.: Hintergrundpapier zur energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin, 2015. URL: https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20151220_prognos_hintergrundpapier_ees.pdf besucht am 12.04.2021.
- [13] Freudenberg, J.; Meyer, H. et al.: Drei Prozent Plus - Das Quartier als Schlüssel zur Steigerung der Sanierungsrate: Erkenntnisse aus dem Drei Prozent Projekt – energieeffizienter Sanierungsfahrplan für kommunale Quartiere 2050. Berlin, 2019. URL: https://www.deutscher-verband.org/fileadmin/user_upload/documents/Brosch%C3%BCren/3_plus-Broschuere_gesamt_FINAL.pdf besucht am 12.04.2021.
- [14] Jochum, P.; Mellwig, P.: Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands. Berlin, 2015. URL: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Beuth_ifeu_Daemmbarkeit_des_deutschen_Gebaeudebestands_2015.pdf besucht am 12.04.2021.
- [15] Reinhardt, J.; Veith, C. et al.: Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen. Heidelberg, 2019. URL: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Bericht-D%C3%A4mmstoffe_23032020.pdf besucht am 12.04.2021.
- [16] Sprengard, C.; Treml, S.; Holm, A. H.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe: Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Hrsg. von Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München. Gräfelfing, 2013. URL: https://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf besucht am 12.04.2021.

- [17] Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V.: Transparente Wärmedämmung: Planerische Grundlagen und Hinweise. Hrsg. von Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V. Gundelfingen, 2000. URL: <http://www.umwelt-wand.de/twd/service/infos/info3.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [18] Russ, C.: Einsatz transparenter Wärmedämmung zur Gebäudesanierung. In: Energie. Hrsg. von Hoffmann, V. U.; Thiele, R. Bd. 3. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 1994, S. 82–94.
- [19] Kaushika, N. D.; Sumathy, K.: Solar transparent insulation materials: a review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 7.4, 2003, S. 317–351.
- [20] Lien, A. G.; Hestnes, A. G.; Aschehoug, Ø.: The use of transparent insulation in low energy dwellings in cold climates. In: Solar Energy 59.1-3, 1997, S. 27–35.
- [21] Wong, I. L.; Eames, P. C.; Perera, R. S.: A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. In: Solar Energy 81.9, 2007, S. 1058–1071.
- [22] Manz, H.; Egolf, P.; Suter, P.; Goetzberger, A.: TIM-PCM external wall system for solar space heating and daylighting. In: Solar Energy 61.6, 1997, S. 369–379.
- [23] Twidell, J. W.; Johnstone, C.; Zuhdy, B.; Scott, A.: Strathclyde University's passive solar, low-energy, residences with transparent insulation. In: Solar Energy 52.1, 1994, S. 85–109.
- [24] Braun, P. O.; Goetzberger, A.; Schmid, J.; Stahl, W.: Transparent insulation of building facades—Steps from research to commercial applications. In: Solar Energy 49.5, 1992, S. 413–427.
- [25] Berardi, U.: The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project. In: Applied Energy 154, 2015, S. 603–615.
- [26] Paneri, A.; Wong, I. L.; Burek, S.: Transparent insulation materials: An overview on past, present and future developments. In: Solar Energy 184, 2019, S. 59–83.
- [27] Pfundstein, M.; Spitzner, M. H.; Rodolphi, A.; Gellert, R.: Dämmstoffe: Grundlagen, Materialien, Anwendungen. Berlin und München, 2007. URL: http://www.degruyter.com/search?f_0=isbnissn&q_0=9783955530211&searchTitles=true.
- [28] Jelle, B. P.: Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. In: Energy and Buildings 43.10, 2011, S. 2549–2563.
- [29] Jelle, B. P.; Gustavsen, A.; Baetens, R.: The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. In: Journal of Building Physics 34.2, 2010, S. 99–123.

- [30] Villasmil, W.; Fischer, L. J.; Worlitschek, J.: A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103, 2019, S. 71–84.
- [31] Papadopoulos, A. M.: State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. In: *Energy and Buildings* 37.1, 2005, S. 77–86.
- [32] Abu-Jdayil, B.; Mourad, A.-H. et al.: Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. In: *Construction and Building Materials* 214, 2019, S. 709–735.
- [33] Schiavoni, S.; D'Alessandro, F.; Bianchi, F.; Asdrubali, F.: Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 2016, S. 988–1011.
- [34] Aditya, L.; Mahlia, T. et al.: A review on insulation materials for energy conservation in buildings. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 2017, S. 1352–1365.
- [35] Al-Homoud, M. S.: Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. In: *Building and Environment* 40.3, 2005, S. 353–366.
- [36] Baetens, R.; Jelle, B. P.; Gustavsen, A.; Grynning, S.: Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review. In: *Energy and Buildings* 42.11, 2010, S. 1969–1975.
- [37] Griffith, B.; Arasteh, D.: Gas-filled panels: A thermally improved building insulation. In: *Thermal performance of the exterior envelopes of buildings V*, Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference. Clear Water Beach, Florida, 1992, S. 1–13.
- [38] Gonçalves, M.; Simões, N.; Serra, C.; Flores-Colen, I.: A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. In: *Applied Energy* 257, 2020, S. 114028.
- [39] Batard, A.; Duforestel, T.; Flandin, L.; Yrieix, B.: Prediction method of the long-term thermal performance of Vacuum Insulation Panels installed in building thermal insulation applications. In: *Energy and Buildings* 178, 2018, S. 1–10.
- [40] Baetens, R.; Jelle, B. P. et al.: Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. In: *Energy and Buildings* 42.2, 2010, S. 147–172.
- [41] Simmler, H.; Brunner, S. et al.: Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A). Hrsg. von High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39. 2005. URL: http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_39_Report_Subtask-A.pdf besucht am 12.04.2021.

- [42] Lide, D. R. (Hrsg.): CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data. 84th ed. Boca Raton, CRC Press, 2003.
- [43] Jousten, K. (Hrsg.): Wutz Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis. Wiesbaden und s.l., Vieweg+Teubner Verlag, 2004.
- [44] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel; Deutsche Fassung EN 998-1:2016. Berlin, 2017.
- [45] Maia, J.; Ramos, N. M.; Freitas, V. P. de; Sousa, Â.: Laboratory Tests and Potential of Thermal Insulation Plasters. In: Energy Procedia 78, 2015, S. 2724–2729.
- [46] Wakili, K. G.; Stahl, T. et al.: High Performance Aerogel Containing Plaster for Historic Buildings with Structured Façades. In: Energy Procedia 78, 2015, S. 949–954.
- [47] Fenoglio, E.; Fantucci, S. et al.: Hygrothermal and environmental performance of a perlite-based insulating plaster for the energy retrofit of buildings. In: Energy and Buildings 179, 2018, S. 26–38.
- [48] Forschung für die energieeffiziente Industrie: Energieintensive Branchen: Daten zu besonders energiehungrigen Produktionsbereichen. URL: <https://eneff-industrie.info/quickinfos/energieintensive-branchen/daten-zu-besonders-energiehungrigen-produktionsbereichen/> besucht am 23.08.2020.
- [49] Peterková, J.; Zach, J.; Sedlmajer, M.: Development of advanced plasters for insulation and renovation of building constructions with regard to their hygrothermal behaviour. In: Cement and Concrete Composites 92, 2018, S. 47–55.
- [50] Zach, J.; Hela, R.; Sedlmajer, M.; Hroudova, J.: Development of Thermal Insulation Plasters for Insulating and Sanitation of Building Constructions. In: International Journal of Engineering and Technology, 2013, S. 395–397.
- [51] Silva, L. M.; Ribeiro, R. A.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M.: Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar. In: Cement and Concrete Composites 32.1, 2010, S. 19–24.
- [52] Barbero, S.; Dutto, M.; Ferrua, C.; Pereno, A.: Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. In: Energy and Buildings 77, 2014, S. 40–47.
- [53] Fixit: Fixit 222 Aerogel Hochleistungsdämmputz. 2020. URL: https://www.hasit.de/media/importer_assets/188707.pdf besucht am 12.04.2021.
- [54] Franken Maxit GmbH: maxit eco 72. 2020. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-GEECO72.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [55] Berardi, U.: The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits. In: Energy Procedia 134, 2017, S. 626–635.

- [56] Soleimani Dorcheh, A.; Abbasi, M. H.: Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. In: Journal of Materials Processing Technology 199.1-3, 2008, S. 10–26.
- [57] Zeng, S. Q.; Hunt, A. J.; Cao, W.; Greif, R.: Pore Size Distribution and Apparent Gas Thermal Conductivity of Silica Aerogel. In: Journal of Heat Transfer 116.3, 1994, S. 756–759.
- [58] Koebel, M.; Rigacci, A.; Achard, P.: Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. In: Journal of Sol-Gel Science and Technology 63.3, 2012, S. 315–339.
- [59] Pierre, A. C.; Pajonk, G. M.: Chemistry of aerogels and their applications. In: Chemical reviews 102.11, 2002, S. 4243–4265.
- [60] Baetens, R.; Jelle, B. P.; Gustavsen, A.: Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. In: Energy and Buildings 43.4, 2011, S. 761–769.
- [61] Buratti, C.; Moretti, E.; Belloni, E.: Aerogel Plasters for Building Energy Efficiency. In: Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency. Hrsg. von Pacheco Torgal, F.; Buratti, C. et al. Bd. 77. Cham, Springer International Publishing, 2016, S. 17–40.
- [62] Schuss, M.; Pont, U.; Mahdavi, A.: Long-term experimental performance evaluation of aerogel insulation plaster. In: Energy Procedia 132, 2017, S. 508–513.
- [63] Ghazi Wakili, K.; Dworatzky, C. et al.: Energy efficient retrofit of a prefabricated concrete panel building (Plattenbau) in Berlin by applying an aerogel based rendering to its façades. In: Energy and Buildings 165, 2018, S. 293–300.
- [64] XERAL: XERAL SP 028 Wärmedämmputz. 2019. URL: https://www.xeral.com/Produktdatenblatt/TDB_XERAL_SP_028_Waermedaemmputz.pdf besucht am 12.04.2021.
- [65] HECK Wall Systems GmbH: HECK AERO iP WA. 2017. URL: https://doc.colfirmit.de/php/index.pdf?download&pfile=0_17153_1&prod=3705&lang=0&check=f6fb99b25dc0e9fce755160ab5354fc2&changed=1506031200 besucht am 12.04.2021.
- [66] Lehmann, S.; Schwinger, L. et al.: Mikro-Hohlglaskugeln als Basis energieeffizienter Dämmung von Gebäuden. In: Beiträge der Konferenz für neue Materialien im Bauwesen am 31. Januar 2018 in Berlin. Hrsg. von Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. Berlin, Fraunhofer IRB Verlag, 2018, S. 21–25.
- [67] raumprobe OHG: Hochleistungsdaämmputz HASIT Fixit 222. URL: <https://www.raumprobe.com/de/material/hochleistungsdaemmputz-mit-aerogel-stein--11555-01-10052> besucht am 12.04.2021.

- [68] Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co.: maxit ecosphere. 2020. URL: <https://www.maxit-ecosphere.de/> besucht am 12.04.2021.
- [69] Platzer, W. J.: Bestimmung des solaren Energiegewinns durch Massivwände mit transparenter Wärmedämmung: Richtlinie des Fachverbandes Transparente Wärmedämmung e.V. Hrsg. von Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V. Gundelfingen, 2000. URL: <http://www.umwelt-wand.de/twd/service/hilfen/richtlinie0006.pdf>.
- [70] Sun, Y.; Wilson, R.; Wu, Y.: A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. In: Applied Energy 226, 2018, S. 713–729.
- [71] Wittwer, V.; Platzer, W.: Transparent thermal insulation materials and systems: state of the art and potential for the future. In: High Temperatures-High Pressures 32.2, 2000, S. 143–158.
- [72] Dowson, M.: Novel retrofit technologies incorporating silica aerogel for lower energy buildings. London, Brunel University School of Engineering and Design Theses, 2012.
- [73] Schultz, J. M.; Jensen, K. I.: Evacuated aerogel glazings. In: Vacuum 82.7, 2008, S. 723–729.
- [74] Čekon, M.; Slávik, R.; Zach, J.: Experimental Analysis of Transparent Insulation Based on Poly-carbonate Multi-Wall Systems: Thermal and Optical Performance. In: Energy Procedia 132, 2017, S. 502–507.
- [75] Platzer, W. J.: Solar transmission of transparent insulation material. In: Solar Energy Materials 16.1-3, 1987, S. 275–287.
- [76] Platzer, W. J.: Directional-hemispherical solar transmittance data for plastic honeycomb-type structures. In: Solar Energy 49.5, 1992, S. 359–369.
- [77] Symons, J. G.: The Solar Transmittance of Some Convection Suppression Devices for Solar Energy Applications: An Experimental Study. In: Journal of Solar Energy Engineering 104.3, 1982, S. 251–256.
- [78] Symons, J. G.; Christie, E. A.; Peck, M. K.: Integrating sphere for solar transmittance measurement of planar and nonplanar samples. In: Applied optics 21.15, 1982, S. 2827–2832.
- [79] Buchberg, H.; Edwards, D. K.: Design considerations for solar collectors with cylindrical glass honeycombs. In: Solar Energy 18.3, 1976, S. 193–203.
- [80] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Glas im Bauwesen - Bestimmung der licht-technischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung DIN EN 410:2011. Berlin, 2011.
- [81] Kuhn, T. E.: Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady-state laboratory measurements. In: Energy and Buildings 84, 2014, S. 388–402.

- [82] Platzer, W. J.: The ALTSET Project: Measurement of angular properties for complex glazings. In: Proceedings / EuroSun 2000, ISES Europe Solar Congress. Hrsg. von Furbo, S. Copenhagen, 2001. URL: http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/16_Werner_Platzer_The_ALTSET_project_Angular_Properties_of_Co.pdf.
- [83] Platzer, W. J.: Energy performance assessment method: A step towards standardisation. In: Book of proceedings / EuroSun 98, The Second ISES Europe Solar Congress. Hrsg. von Goetzberger, A. Birmingham, Franklin, 1999.
- [84] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Berlin, 2003.
- [85] Platzer, W. J.: Total heat transport data for plastic honeycomb-type structures. In: Solar Energy 49.5, 1992, S. 351–358.
- [86] Bosy, B.: Passive Sonnenenergienutzung: Trombe-Wand + Sonnenwand (TWD). URL: <http://www.bosy-online.de/Trombewand.htm> besucht am 12.04.2021.
- [87] Lohmeyer, H.: „Solarheizung für Gebäude“. DE 3529931 A1. 1985. URL: <https://patents.google.com/patent/DE3529931A1/de?q=DE3529931A1>, besucht am 12.04.2021,
- [88] Mager, M.: „Energiefassade als Vorsatzschale für massive tragende und nicht tragende Außenwände“. DE 3210238 A1. 1982. URL: <https://patents.google.com/patent/DE3210238A1/de?q=DE3210238A1>, besucht am 12.04.2021,
- [89] Mittasch, T.: „Fassadenverkleidung für sonnenseitige Gebäudewände“. AT 375125 B. 1982. URL: <https://patents.google.com/patent/AT375125B/de?q=AT375125B>, besucht am 12.04.2021,
- [90] Cabot Corporation: Lumira® Aerogel zur Tageslichtnutzung. 2013. URL: <https://www.cabotcorp.de/-/media/files/brochures/aerogel/brochure-lumira-aerogel-for-daylighting.pdf?rev=ae8ed3c810d2466c857945c04bdf7f26> besucht am 12.04.2021.
- [91] Kisilewicz, T.: Experimental field testing of transparent insulation. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/295136960_Experimental_field_testing_of_transparent_insulation besucht am 12.04.2021.
- [92] Langer, E. H.: Marktdurchbruch? Transparente Wärmedämmung als Verbundsystem. 1996. URL: <https://www.dgs.de/fileadmin/sonnenenergie/SE-2-1996-ganz/11-transparente-Waermedaemmung.PDF> besucht am 12.04.2021.
- [93] Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V.: Produktbeschreibung Sto AG. URL: http://umwelt-wand.de/twd/produkte/specs/sp_sto.html besucht am 12.04.2021.

- [94] Sto SE & Co. KGaA: Technisches Merkblatt: StoSolar Fassadenelement. 2014. URL: https://www.sto.de/webdocs/0000/SDB/T_02667-002_0101_DE_01_03.PDF besucht am 12. 04. 2021.
- [95] GAP solutions GmbH: GAP:skin: Technische Unterlagen. URL: http://www.gap-solutions.at/fileadmin/user_upload/Downloadarea/Technische_Unterlagen_Public/gap_skin/Broschuere_GAP.skin.pdf besucht am 12. 04. 2021.
- [96] Mösl, R.: Wärmedämmung transparent. 2005. URL: <https://wohnen.pege.org/2005-weiz-sanierung/waermedaemmung-transparent.htm> besucht am 12. 04. 2021.
- [97] Sun, Y.; Liang, R. et al.: Glazing systems with Parallel Slats Transparent Insulation Material (PS-TIM): Evaluation of building energy and daylight performance. In: *Energy and Buildings* 159, 2018, S. 213–227.
- [98] Liang Wong, I.; Eames, P.; Perera, S.: Energy simulations of a transparent–insulated office façade retrofit in London, UK. In: *Smart and Sustainable Built Environment* 1.3, 2012, S. 253–276.
- [99] Souayfane, F.; Biwole, P. H.; Fardoun, F.: Thermal behavior of a translucent superinsulated latent heat energy storage wall in summertime. In: *Applied Energy* 217, 2018, S. 390–408.
- [100] Arce, P.; Medrano, M. et al.: Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. In: *Applied Energy* 88.8, 2011, S. 2764–2774.
- [101] Memarian, S.; Kari, B. M.; Fayaz, R.; Asadi, S.: Single and combined phase change materials: Their effect on seasonal transition period. In: *Energy and Buildings* 169, 2018, S. 453–472.
- [102] Gracia, A. de; Cabeza, L. F.: Phase change materials and thermal energy storage for buildings. In: *Energy and Buildings* 103, 2015, S. 414–419.
- [103] Soares, N.; Costa, J. J.; Gaspar, A. R.; Santos, P.: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency. In: *Energy and Buildings* 59, 2013, S. 82–103.
- [104] Paksoy, H. Ö.: *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design*. Bd. 234. NATO Science Series, Mathematics, Physics and Chemistry. Dordrecht, Springer, 2007. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10167610>.

- [105] Mehling, H.; Schossig, P.; Kalz, D.: Latentwärmespeicher in Gebäuden: Wärme und Kälte kompakt und bedarfsgerecht speichern. Hrsg. von FIZ Karlsruhe GmbH. Karlsruhe, 2009. URL: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/I_2009/TI_0I09_Internetx.pdf besucht am 23.08.2020.
- [106] Cabeza, L. F.; Castell, A. et al.: Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.3, 2011, S. 1675–1695.
- [107] Schossig, P.: Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen: Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005. Stuttgart, IRB Verlag, 2007.
- [108] Lan, H.; Dutta, S. et al.: Graphite foam infiltration with mixed chloride salts as PCM for high-temperature latent heat storage applications. In: *Solar Energy* 209, 2020, S. 505–514.
- [109] Kośny, J.: PCM-enhanced building components: An application of phase change materials in building envelopes and internal structures. *Engineering materials and processes*. Cham, Springer, 2015.
- [110] Pomianowski, M.; Heiselberg, P.; Zhang, Y.: Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. In: *Energy and Buildings* 67, 2013, S. 56–69.
- [111] Kuznik, F.; David, D.; Johannes, K.; Roux, J.-J.: A review on phase change materials integrated in building walls. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.1, 2011, S. 379–391.
- [112] Kant, K.; Shukla, A.; Sharma, A.: Heat transfer studies of building brick containing phase change materials. In: *Solar Energy* 155, 2017, S. 1233–1242.
- [113] Lachheb, M.; Younsi, Z. et al.: Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation. In: *Applied Thermal Engineering* 111, 2017, S. 49–59.
- [114] Jin, X.; Medina, M. A.; Zhang, X.: On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction. In: *Energy* 73, 2014, S. 780–786.
- [115] Casini, M.: Phase-change materials. In: *Smart Buildings*. Elsevier, 2016, S. 179–218.
- [116] Barba, A.; Spiga, M.: Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks. In: *Solar Energy* 74.2, 2003, S. 141–148.
- [117] Microtek Laboratories Inc.: Micronal®. URL: <https://www.microteklabs.com/micronal> besucht am 12.04.2021.
- [118] Rigips AG: Alba®balance: Die Vollgipsplatte für ein ausgewogenes Raumklima. URL: <https://www.gypsum4wood.ch/de/Bauplatten/Alba-balance> besucht am 12.04.2021.

- [119] smartpolymer GmbH: smartPCM: PCM-Wärme- und Kältespeichermaterialien: Hightech-Material für vielseitigste Anwendungen. URL: <https://www.smartpolymer.de/1/deutsch/produkte/smartpcm/index.php> besucht am 12.04.2021.
- [120] Zhang, Y. P.; Lin, K. P. et al.: Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. In: Energy and Buildings 38.10, 2006, S. 1262–1269.
- [121] Gilbert, J.; Koster, U.: Phase Change Materials: New thermal mass solution for low inertia buildings. Hrsg. von DuPont™ Energain® PCM guidebook Edition December 2010. 2010. URL: [http://www.edsl.myzen.co.uk/downloads/misc/DuPont%20ENERGAIN\(r\)%20PCM%20Guidebook_December%202010.pdf](http://www.edsl.myzen.co.uk/downloads/misc/DuPont%20ENERGAIN(r)%20PCM%20Guidebook_December%202010.pdf).
- [122] Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Experimental and numerical study on the solar gain and heat loss of typical existing and refurbished German buildings. In: iCRBE Procedia 1.1, 2020, S. 75–93.
- [123] Malz, S.; Steininger, P. et al.: On the Development of a Building Insulation using Air Layers with Highly Reflective Interfaces. In: Energy and Buildings 236, 2021, S. 110779.
- [124] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fundamentals of metrology - Part 3: Evaluation of measurements of a single measurand, measurement uncertainty. Berlin, 1996.
- [125] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Thermal performance of buildings - Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter - Masonry; German version EN 1934:1998. Berlin, 1998.
- [126] Kompetenzzentrum der Initiative „Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen“: Wohngebäudebestand und Nutzungsperspektiven. 2009. URL: <https://www.online-immoberater.de/doc/Wohngebäudebestand-u-Nutzungsperspektiven.pdf?style=plain> besucht am 12.04.2021.
- [127] ASTM International: ASTM G173-03: Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface. West Conshohocken, PA, 2012.
- [128] Porextherm Dämmstoffe GmbH: Datenblatt Vacupor® NT-B2-S. 2018. URL: <http://www.morganthermalceramics.com/media/4114/vacupor-nt-b2-s-data-sheet-german-v2.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [129] URSA Deutschland GmbH: Produktdatenblatt URSA XPS. 2018. URL: <https://www.ursa.de/de-de/produkte/ursa-xps/Documents/dp-xps-n3l.pdf> besucht am 12.04.2021.

- [130] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 13986:2004+A1:2015. Berlin, 2015.
- [131] ASTM International: ASTM E927-19: Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing. West Conshohocken, PA, 2019.
- [132] Hammerschmidt, U.; Meier, V.: New Transient Hot-Bridge Sensor to Measure Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Volumetric Specific Heat. In: International Journal of Thermophysics 27.3, 2006, S. 840–865.
- [133] Kalkwerk Rygol GmbH & Co.KG: RYGOL Kalk-Gips-Leichtputz. URL: http://www.rygol-sakret.de/fileadmin/user_upload/tm/tm_kalkgips_leichtputz_mip02_1.pdf besucht am 12.04.2021.
- [134] Franken Maxit GmbH: maxit ip 18 Kalk-Zement-Putz. 2020. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G2IP%2018.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [135] Franken Maxit GmbH: maxit kreasil 5020 Silikatfarbe. 2019. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-FE5020.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [136] Franken Maxit GmbH: maxit Siliconharzfarbe A 7030. 2020. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-FDSILICOFA%20A.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [137] Franken Maxit GmbH: maxit multi 262 Renoviermörtel, hell. 2020. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G8MULTI%20262.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [138] Franken Maxit GmbH: maxit eco 73. 2019. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G9ECO73.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [139] Franken Maxit GmbH: maxit ip artista Modellier-/Strukturputz. 2020. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G7ARTISTA.pdf> besucht am 12.04.2021.
- [140] Fixit: Fixit 223 Spezial Einbettmörtel. 2020. URL: https://www.hasit.de/media/importer_assets/188718.pdf besucht am 12.04.2021.
- [141] HASIT: HASIT 251 Renostar Renovierspachtel. 2020. URL: https://www.hasit.de/media/importer_assets/188701.pdf besucht am 12.04.2021.
- [142] Fixit: Fixit 775 Innenabrieb extraweiss. 2020. URL: https://mamview.fixit-holding.com/CIP/mediadelivery/rendition/100_226807 besucht am 12.04.2021.
- [143] RÖFIX: RÖFIX PE 225 RENO 1K. 2020. URL: https://www.roefix.at/media/importer_assets/211787.pdf besucht am 12.04.2021.

- [144] Cosmos Indirekt: Sonnenstandsdiagramm. URL: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sonnenstandsdiagramm> besucht am 12. 04. 2021.
- [145] Schott AG: DURAN®: Tubing, rods and capillaries made of borosilicate glass 3.3. 2016. URL: https://www.schott.com/d/tubing/66ee849c-cad9-42a3-97cb-67fd0534e3fb/schott_duran_brochure_gb_final.pdf besucht am 12. 04. 2021.
- [146] Franken Maxit GmbH: maxit mur 900 Dünnbettmörtel. 2017. URL: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-T1MUR%20900.pdf> besucht am 12. 04. 2021.
- [147] Kremer Pigmente GmbH & Co. KG: Iron Oxide Black 318, high tinting. 2018. URL: https://www.kremer-pigmente.com/media/pdf/48400_SDS.pdf besucht am 12. 04. 2021.
- [148] Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Transient performance of a solar selective thermal insulation system. In: 16th Advanced Building Skins Conference & Expo, 21-22 October 2021, Bern, Switzerland. Lucerne (Switzerland), Advanced Building Skins GmbH, 2021, S. 506–515.
- [149] SASOL Germany GmbH: PARAFOL 17 -97. 2019. URL: https://sasoldcproducts.blob.core.windows.net/documents/Safety%20Datasheets/d1fae66b-a54b_EU_PARAFOL%2017-97_EN-US.pdf besucht am 12. 04. 2021.
- [150] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001. Berlin, 2001.
- [151] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. Berlin, 2010.
- [152] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Berlin, 2017.
- [153] Gomes, M. G.; Flores-Colen, I. et al.: The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. In: Construction and Building Materials 135, 2017, S. 279–286.
- [154] Ozisik, M. N.; Orlande, H. R.: Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications. Boca Raton, Routledge, 2018.

- [155] Kern GmbH: Polymethylmethacrylat (PMMA). 2020. URL: <https://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?lng=1&nr=2610> besucht am 12. 04. 2021.
- [156] Steininger, P.; Gaderer, M.; Steffens, O.; Dawoud, B.: Experimental and Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of a Newly-Developed Solar Active Thermal Insulation System. In: Buildings 11.3, 2021, S. 123.
- [157] Platzer, W. J.: Intercomparison Testing on Conventional Glazings. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/283500364_Intercomparison_Testing_on_Conventional_Glazings besucht am 12. 04. 2021.
- [158] Battisti, K.: Putz: Kalkgipsputz (1300) ON V 31: 2001, Kat. Nr.: 2.212.012 (Basiskatalog Österreich). 2008. URL: <http://bphdb.com/material/show/1703> besucht am 12. 04. 2021.
- [159] Battisti, K.: Putz: Kalkzementputz, außen (1800) ON V 31: 2001, Kat. Nr.: 2.212.012 (Basiskatalog Österreich). 2008. URL: <http://www.bphdb.com/material/show/1696> besucht am 12. 04. 2021.
- [160] Anton Schweizer: Wärmekapazität Holzwerkstoffe. 2020. URL: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php besucht am 12. 04. 2021.
- [161] baubook GmbH: URSA XPS N-III-L. 2017. URL: <https://www.baubook.info/m/PHP/Info.php?SI=2142684728&win=y&SW=16&lng=2> besucht am 12. 04. 2021.
- [162] DCTech: Technical Data Sheet - Vacuum Insulated Panels. 2018. URL: <https://dctech.com.au/vacuum-insulated-panels/> besucht am 12. 04. 2021.
- [163] VDI-Wärmeatlas: Mit 320 Tabellen. 11., bearb. und erw. Aufl. VDI-Buch. Berlin, Springer Vieweg, 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3>.
- [164] COMSOL: Material Library User's Guide. 2018. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.matlib/MaterialLibraryUsersGuide.pdf> besucht am 12. 04. 2021.
- [165] COMSOL: Ray Optics Module User's Guide. 2018. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.roptics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf> besucht am 12. 04. 2021.
- [166] Landau, L. D.; Lifšic, E. M.: The classical theory of fields. 4., rev. Engl. ed. Pergamon international library of science, technology, engineering, and social studies. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig, Pergamon Press, 1975.
- [167] Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Assessment of the Annual Transmission Heat Loss Reduction of a Refurbished Existing Building with an Advanced Solar Selective Thermal Insulation System. In: Sustainability 13.13, 2021, S. 7336.
- [168] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. Berlin, 2018.

- [169] Deutscher Wetterdienst: Stündliche Klimadaten. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/ besucht am 12. 04. 2021.
- [170] Schild, K.; Willems, W. M.: Vereinfachte Berechnung des Heizenergiebedarfs. In: Wärmeschutz. Hrsg. von Schild, K.; Willems, W. M. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 233–239.

Anhang

Kennwerte konventioneller Wärmedämmmaterialien

Tabelle A.1 listet für gängige konventionelle Wärmedämmmaterialien, unterteilt nach ihrer Form, wesentliche bauphysikalische und gebäuderelevante Kennwerte auf.

Hersteller transparenter Wärmedämmmaterialien

Tabelle A.2 zeigt verschiedene Hersteller von transparenten Wärmedämmmaterialien, deren zugehörige Strukturen und die verwendeten Materialien.

Tabelle A.1: Bauphysikalische und gebäuderelevante Kennwerte gängiger konventioneller Wärmedämmmaterialien entsprechend ihrer Form [34, 35].

Form	Material	Rohdichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	Brandverhalten	Dämmbezogene Kosten
Matte / Rolle	Glaswolle	12-56	0,040-0,033	**	++
	Steinwolle	40-200	0,037	***	++
	Polyethylen	35-40	0,041	*	++
Einblas- / Einfülldämmung	Glaswolle	10-48	0,038-0,030	**	++
	Steinwolle	45-65	0,04	****	++
	Zellulose ^a	24-36	0,054-0,046	***	++
	Perlite	32-176	0,060-0,040	****	++++
	Vermiculite	64-130	0,068-0,063	****	++++
Plattendämmung	Glaswolle	24-112	0,035-0,032	**	+++
	Expandiertes Polystyrol	16-35	0,038-0,037	*	+
	Extrudiertes Polystyrol	26-45	0,032-0,030	*	++++
	Polyurethan & Polyisocyanurat	40-55	0,023	*	++++
	Perlite	32-176	0,060-0,040	***	++++
	Vermiculite	64-130	0,068-0,063	***	++++
Einspritzdämmung	Zellulose ^a	24-36	0,054-0,046	***	++++
Sprühschaumdämmung	Polyurethan & Polyisocyanurat	40-55	0,023	*	++++

Brandverhalten: **** (gut) - * (schlecht)

Dämmbezogene Kosten: ++++ (hoch) - + (gering)

^aFeuerbeständigkeit chemisch erhöht

Tabelle A.2: Auflistung verschiedener Hersteller von transparenten Wärmedämmmaterialien sowie zugehörige Strukturen und Materialien [26].

Hersteller	Marke	Struktur	Material
Wacotech	TIMax CA	Absorber-senkrecht - Wabe	Cellulose-Triacetat
Wacotech	TIMax GL/S	Hohlraum	Glasfaser
Sto	StoTherm Solar	Absorber-senkrecht - Kapillare	Polycarbonat
OKALUX	OKAPANE, KAPIPANE	Absorber-senkrecht	Polymethylmethacrylat
GAP solutions GmbH	Solarwabe	Absorber-senkrecht - Wabe	Karton
COVESTRO	Makrolon® Multiwall	Hohlraum	Polycarbonat
Advanced Glazing's Ltd.	Transparent InsolCore®	Absorber-senkrecht - Wabe	Polypropylen
CPI Daylighting	Pentaglas® - Nano-Cell® Technology	Hohlraum	Polycarbonat
Kingspan Limited	Kingspan Architectural	Hohlraum	Polycarbonat
Pilkington	Pilkington Profilit™	Absorber-parallel	Profilglas
SABIC	LEXAN™ Thermoclear™	Hohlraum	Polycarbonat
CABOT Corporation	Lumira® aerogel	Quasi-homogen - Granular	Silika-Aerogel
Nano High-Tech Co. Ltd.	Nanuo - Daylighting panel (TP)	Quasi-homogen - Partikel	Silika-Aerogel
Airglass AB	Airglass	Quasi-homogen - Monolithisch	Silika-Aerogel
Green Earth Aerogels Technologies	GEAT SILICA AEROGEL AAA	Quasi-homogen - Aerogel Pellets	Silika-Aerogel
ENERSENS	Kwark® white	Quasi-homogen - Granular	Silika-Aerogel
JIOS Aerogel Corporation	JIOS AeroVa® Aerogel powder	Quasi-homogen - Pulver	Silika-Aerogel
Aerogel Technologies, LLC	Classic Silica™ aerogel	Quasi-homogen - Monolithisch	Silika-Aerogel
Guangdong Alison Hi-Tech Co., Ltd.	Alison Aerogel	Quasi-homogen - Partikel	Silika-Aerogel

Veröffentlichungen

- Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Experimental and numerical study on the solar gain and heat loss of typical existing and refurbished German buildings. In: iCRBE Procedia 1.1, 2020, S. 75–93. doi: 10.32438/iCRBE.202035 [122]
- Steininger, P.; Gaderer, M.; Steffens, O.; Dawoud, B.: Experimental and Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of a Newly-Developed Solar Active Thermal Insulation System. In: Buildings, 2021, 11.3, 123. doi: 10.3390/buildings11030123 [156]
- Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Assessment of the Annual Transmission Heat Loss Reduction of a Refurbished Existing Building with an Advanced Solar Selective Thermal Insulation System. In: Sustainability, 2021, 13.13, 7336. doi: 10.3390/su13137336 [167]
- Steininger, P.; Gaderer, M.; Dawoud, B.: Transient performance of a solar selective thermal insulation system. In: 16th Advanced Building Skins Conference & Expo, 21-22 October 2021, Bern, Switzerland, S. 506-515. ISBN: 978-3-9524883-6-2 [148]
- Malz, S.; Steininger, P.; Dawoud, B.; Krenkel, W.; Steffens, O.: On the Development of a Building Insulation using Air Layers with Highly Reflective Interfaces. In: Energy and Buildings, 2021, 110779. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110779 [123]
- Steininger et. al.: „Solaraktives Wärmedämmsystem mit lichtleitenden Elementen (B79140)“. Erfindungsmeldung Bayerische Patentallianz (BayPAT). 2020.

Lebenslauf

Name	Peter Steininger
Geburtsdatum	30.04.1992
Geburtsort	Regensburg
Nationalität	deutsch, österreichisch
Familienstand	verheiratet

03/2016 - 10/2017	Maschinenbaustudium, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Abschluss: Master of Science (M.Sc.)
10/2012 - 03/2016	Maschinenbaustudium, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Abschluss: Bachelor of Engineering (B.Eng.)
09/1998 - 07/2012	Grundschule, Mittelschule und Gymnasium in Regensburg, Abschluss: Abitur